

Perjanjian No: **III/LPPM/2012-02/49-P**

**Uji Eksperimental Kuat Lentur Balok dan Pelat Beton Bertulang
dengan Agregat Kasar dan Halus Beton Daur Ulang**



**Disusun oleh:
Buen Sian
Adhijoso Tjondro
Riani Sidauruk
Sisi Nova Rizkiani**

**Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat
Universitas Katolik Parahyangan
(2013)**

Prakata

Puji Syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa dan ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat yang telah mendanai biaya penelitian ini.

Penelitian dilakukan sepenuhnya di Laboratorium Struktur Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Katolik Parahyangan Bandung. Terima kasih kami ucapkan juga kepada Bapak Teguh Farid Nurul Iman, ST., Bapak Cuncun Priatna, dan Bapak Jaja yang membantu dalam pembuatan bekisting, benda uji, dan pengujian di laboratorium.

Besar harapan kami bahwa penelitian ini dapat memberikan sumbangan bagi pengetahuan untuk dunia Teknik Sipil dan bermanfaat bagi yang memerlukannya.

Bandung, April 2013

Buen Sian

Johannes Adhijoso Tjondro

Riani Sidauruk

Sisi Nova Rizkiani

ABSTRACT

In this experimental study, recycled concrete was used on cylinder specimens, the reinforced concrete beams, and the reinforced concrete slabs. Recycled concrete made of waste material from laboratory experiment is used for fine and coarse aggregates in this experiment. Cylinder specimens, beams, and slabs were used to determine the mechanical properties such as compressive strength, shear strength, split tensile strength, and flexural strength. Two mix designs with $f_c' = 25$ MPa and $F_c' = 20$ MPa were used in this study.

Three different percentage variations of recycled concrete aggregates were used in mix design with $f_c' = 20$ MPa. Firstly, it consists of 100% recycled coarse aggregates (RCA) and 0% recycle fine aggregates (RFA). Secondly, it consists of 80% RCA and 20% RFA, and thirdly, it consists of 60% RCA and 40% RFA. Nine reinforced concrete slabs with three variations of mix design were tested. The test results showed that the mechanical properties such as compressive strength, split tensile strength, shear strength, and flexural strength decreased when using more RFA. The flexural strength of reinforced concrete slab showed that the yield and ultimate moment are close to each other, but ductility decreased when the RFA increased.

Three different percentage variations of coarse recycled concrete aggregates (RCA) were used in mix design with $f_c' = 25$ MPa, which are 0%, 50%, and 100% of RCA. The test results showed the characteristics of compressive strength values are: $f_c' = 28.7$ MPa and $f_c' = 28.4$ MPa for each of the mixtures of 50% and 100% RCA. The split tensile strength values are: $f_{ct} = 2.38$ MPa, $f_{ct} = 2.78$ MPa, and $f_{ct} = 2.81$ MPa for 0%, 50% and 100% RCA. While the shear strength are: $F_v = 5.55$ MPa, $f_v = 4.28$ MPa, and $f_v = 3.86$ MPa for 0%, 50%, and 100% RCA.

Keywords: recycled coarse aggregates, recycled fine aggregates, compressive strength, split tensile strength, shear strength, flexural strength, ductility.

DAFTAR ISI

Prakata	i
Abstrak	ii
Daftar Isi	iii
Daftar Notasi	vi
Daftar Tabel	viii
Daftar Gambar	x
1.1 Latar Belakang	1-1
1.2 Tujuan Penelitian	1-3
1.3 Ruang Lingkup	1-4
1.4 Metode Penelitian	1-6
2.1 Beton Sebagai Bahan Bangunan	2-1
2.2 Sifat Agregat	2-2
2.3 Beton Daur Ulang	2-5
2.4 Perencanaan Campuran Beton	2-6
2.5 Kuat Tekan Beton	2-7
2.6 Kuat Tarik Belah Beton	2-8
2.7 Kuat Geser Beton	2-8

2.8	Kuat Lentur Beton	2-9
2.9	Kuat Lentur Balok dan Pelat Beton Bertulang	2-10
2.10	Analisis Penampang Persegi Panjang Beton Bertulang	2-11
2.11	Evaluasi Kuat Tekan Beton	2-12
2.12	Daktilitas	2-14
3.1	Pengujian Beton Keras	3-1
3.2	Pengujian Beton dengan Kuat Tekan Karakteristik 25 Mpa	3-1
3.2.1	Benda Uji	3-2
3.2.2	Pemeriksaan Agregat dan Perencanaan Campuran dengan $f_c' = 25$ MPa	3-2
3.2.3	Pemeriksaan Baja Tulangan	3-4
3.2.4	Uji Kuat Tekan dengan $f_c' = 25$ Mpa	3-7
3.2.5	Uji Palu Beton dengan $f_c' = 25$ Mpa	3-13
3.2.6	Uji Kuat Tarik Belah dengan $f_c' = 25$ Mpa	3-14
3.3	Pengujian Beton dengan Kuat Tekan Karakteristik 20 Mpa	3-17
3.3.1	Benda uji	3-17
3.3.2	Pemeriksaan Agregat dan Perencanaan Campuran dengan $f_c' = 20$ MPa	3-18
3.3.3	Pemeriksaan Baja Tulangan	3-20
3.3.4	Uji Kuat Tekan dengan $f_c' = 20$ Mpa	3-20
3.3.5	Uji Palu Beton dengan $f_c' = 20$ Mpa	3-25
3.3.6	Kuat Tarik Belah dengan $f_c' = 20$ Mpa	3-26

3.3.7 Uji Kuat Geser Balok dengan $f_c' = 20$ Mpa	3-29
4.1 Pengujian Kuat Lentur Balok Tanpa Tulangan	4-1
4.2 Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang	4-3
4.3 Pola Retak Uji Balok Beton Bertulang	4-5
4.4 Daktilitas	4-7
5.1 Pengujian Kuat Lentur Pelat Beton Bertulang	5-1
5.2 Pola Retak Pelat Beton Bertulang	5-4
5.3 Daktilitas Pelat Beton Bertulang	5-5
6.1 Kesimpulan	
6.2 Saran	

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A = Luas penampang

A_s = Luas baja tulangan

a = Tinggi ekuivalen dari *rectangular stress block* pada balok bertulang

b = Lebar penampang

C = Gaya tekan

d = Diameter

δ = Deformasi

f_c = Kuat tekan beton

f_c' = Kuat tekan karakteristik

f_{cr}' = Kuat tekan rata-rata yang ditargetkan

f_{ct} = Kuat leleh

f_v = Kuat geser beton

f_y = Kuat leleh

f_u = Kuat *ultimate*

f_s = Tegangan baja

J_d = Jarak antara gaya tekan dan gaya tarik beton bertulang

L = Panjang benda uji

M = Momen

M_y = Momen pada kondisi leleh

M_u = Momen pada kondisi *ultimate*

n = Jumlah hari pengujian

P = Beban

P_y = Beban pada kondisi leleh

P_u = Beban pada kondisi *ultimate*

R = Modulus of Rupture beton

s = Standart Deviasi

T = Gaya Tarik

W = Berat benda uji

Y = Persamaan regresi kuat tekan beton

RCA = *Recycled Concrete Aggregate*

CTM = *Compression Testing Machine*

UTM = *Universal Testing Machine*

ASTM = *American Society for Testing and Material*

DAFTAR TABEL

2.1	Definisi Beton	2-1
2.2	Sifat Beton Keras Berkaitan dengan Sifat Agregat	2-3
3.1	Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus	3-3
3.2	Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar	3-3
3.3	Proporsi Campuran	3-4
3.4	Pengujian Tarik Tulangan Ulir	3-6
3.5	Pengujian Tarik Tulangan Polos	3-6
3.6	Data Uji Baja Tulangan Ulir Balok Beton	3-6
3.7	Uji Kuat Tekan Beton Campuran 1 dengan 0% RCA	3-8
3.8	Uji Kuat Tekan Beton Campuran 2 dengan 50% RCA	3-8
3.9	Uji Kuat Tekan Beton Campuran 3 dengan 100% RCA	3-9
3.10	Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran 1 dengan 0% RCA	3-10
3.11	Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran 2 dengan 50% RCA	3-11
3.12	Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran 3 dengan 100% RCA	3-12
3.13	Hasil Uji Palu Beton	3-14
3.14	Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Campuran 1 dengan 0% RCA	3-15

3.15	Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Campuran 2 dengan 50% RCA	3-15
3.16	Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Campuran 3 dengan 100% RCA	3-16
3.17	Perbandingan Nilai Kuat Tarik Belah Beton dibagi $\sqrt{f'c'}$	3-17
3.18	Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus dengan $f'c'=20$ MPa	3-19
3.19	Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar dengan $f'c'=20$ MPa	3-19
3.20	Proporsi Campuran dengan $f'c'=20$ MPa	3-20
3.21	Pengujian Tarik Tulangan Baja	3-20
3.22	Pengujian Kuat Tekan Beton Campuran I	3-21
3.23	Pengujian Kuat Tekan Beton Campuran II	3-21
3.24	Pengujian Kuat Tekan Beton Campuran III	3-22
3.25	Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran I	3-23
3.26	Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran II	3-23
3.27	Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran III	3-24
3.28	Faktor Umur Kuat Tekan Beton	3-25
3.29	Kuat Tekan Hammer Test	3-25
3.30	Uji Kuat Tarik Belah Beton Campuran I	3-27
3.31	Uji Kuat Tarik Belah Beton Campuran II	3-27
3.32	Uji Kuat Tarik Belah Beton Campuran III	3-27
3.33	Hasil Kuat Geser Beton dengan Agregat Daur Ulang	3-30

4.1	Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Tanpa Tulangan	4-2
4.2	Perbandingan Nilai Kuat Lentur Beton dibagi $\sqrt{f'c'}$	4-3
4.3	Data Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang	4-4
4.4	Perbandingan Nilai Kuat Lentur Balok Bertulang Hasil Pengujian dan Hasil Perhitungan	4-5
4.5	Daktilitas Akibat Uji Lentur Pada Balok Beton Bertulang	4-7
5.1	Hasil Uji Lentur Pelat Beton Bertulang Daur Ulang	5-2
5.2	Daktilitas Pelat Bertulang Beton dengan Agregat Daur Ulang	5-5

DAFTAR GAMBAR

- 1.1 Sarana dan Prasarana Olimpiade 2012 di London
- 2.1 Bidang Momen pada *Third Loading Bending Test*
- 2.2 Diagram Tegangan dan Regangan Penampang Persegi Empat Beton Bertulang
- 3.1 Agregat Kasar Daur Ulang dan Agregat Alami
- 3.2 Hubungan Beban dan Peralihan Benda Uji Tarik Tulangan Baja Ulir
- 3.3 Hubungan Beban dan Peralihan Benda Uji Tarik Tulangan Baja Polos
- 3.4 Uji Kuat Tekan dengan *Compression Testing Machine*
- 3.5 Grafik Perbandingan Kuat Tekan Terhadap Umur Beton
- 3.6 Uji kuat tarik belah dengan *CTM*
- 3.7 Grafik Perbandingan Kuat Tarik Belah Beton Terhadap Umur Beton
- 3.8 Perkembangan Kuat Tekan Beton
- 3.9 Perbandingan Kuat Tarik Belah Beton Terhadap Umur Beton
- 3.10 Perbandingan Nilai Kuat Tarik Belah dibagi $\sqrt{f'_c}$
- 3.11 Uji Kuat Geser
- 3.12 Perbandingan Nilai Kuat Geser Belah dibagi $\sqrt{f'_c}$
- 4.1 Pengujian Lentur Balok Beton Tanpa Tulangan dengan *UTM*
- 4.2 Grafik Perbandingan Kuat Lentur Balok Tanpa Tulangan
- 4.3 Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang dengan *UTM*
- 4.4 Grafik Perbandingan Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

- 4.5 Pola Retak Akibat Uji Lentur Pada Balok Beton Bertulang 0% RCA
- 4.6 Pola Retak Akibat Uji Lentur Pada Balok Beton Bertulang 50% RCA
- 4.7 Pola Retak Akibat Uji Lentur Pada Balok Beton Bertulang 100% RCA
- 5.1 Uji Lentur Pelat Beton Bertulang
- 5.2 Hubungan Lendutan-Momen pada Uji Pelat Beton Bertulang campuran I
- 5.3 Hubungan Lendutan-Momen pada Uji Pelat Beton Bertulang campuran II
- 5.4 Hubungan Lendutan-Momen pada Uji Pelat Beton Bertulang campuran III
- 5.5 Pola Retak Pelat Beton Bertulang
- 5.6 Pola Retak dan Lepasnya Bongkahan Beton pada Benda Uji

BAB 1

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Industri konstruksi mengalami perkembangan yang sangat cepat dalam memenuhi kebutuhan manusia akan tempat tinggal, sarana, dan prasarana. Namun industri konstruksi berkontribusi menghasilkan sampah atau reruntuhan yang berdampak pada lingkungan. Jumlah sampah konstruksi ini demikian besar sehingga menjadi perhatian dunia untuk menjaga sumber alam yang ada dan mencari alternatif menggunakan material daur ulang, misalnya beton dengan agregat daur ulang.

Sekarang negara atau kota tertentu kadang mempunyai program modernisasi untuk jalan, jembatan, bangunan industri, dan prasarana lainnya, sehingga perlu meruntuhkan bangunan yang ada karena dianggap tidak cocok dengan proyek baru. Terutama di negara maju reruntuhan beton berasal dari beton dengan mutu cukup tinggi seperti rangka bangunan, balok jembatan, dan beton pracetak, sehingga menghasilkan sumber agregat daur ulang dengan kualitas yang berbeda.

Beberapa pengujian beton yang menggunakan agregat daur ulang sudah dilakukan sejak awal 1980. Meskipun ada perbedaan formula yang cukup berarti namun kesimpulan dari pengujian beton daur ulang yang sudah dilakukan perlu dipertimbangkan. Sifat beton dengan agregat daur ulang jika dibandingkan dengan beton yang menggunakan agregat natural misalnya kuat tekan menurun sebesar 10% - 30% dan kuat tarik lebih rendah tidak lebih dari 10%. (El-Reedy, 2009). Agregat daur ulang dapat digunakan sebagai pengganti agregat natural untuk campuran beton setelah dipilih dan disaring (Hansen, 1992; Collin, 1994; Sherwood, 1995). Kuat tekan karakteristik beton tidak dipengaruhi oleh kualitas agregat daur ulang jika rasio air/ semen besar, hanya berpengaruh pada rasio air/semen kecil (Ryu, 2002 dan Padmini et al., 2002).

Material daur ulang termasuk beton daur ulang digunakan untuk pembangunan kompleks, gedung baru, dan jalan pada Olimpiade 2012. Inggris menegaskan bahwa Olimpiade London adalah Olimpiade yang paling berkelanjutan (Gambar 1.1). Pembangunan

berkelanjutan adalah proses pembangunan lahan, kota, bisnis, dan masyarakat yang berprinsip memenuhi kebutuhan sekarang tanpa mengorbankan kepentingan generasi masa depan. Belajar dari pengalaman olimpiade sebelumnya dimana stadion berkapasitas besar dan fasilitas lain tidak bisa digunakan maksimal lagi setelah pesta olimpiade berakhir.



Gambar 1.1 Sarana dan Prasarana Olimpiade 2012 di London (www.Olimpiade)

Agregat kasar maupun agregat halus daur ulang dipakai dalam penelitian ini. Agregat daur ulang berupa bekas benda uji silinder beton yang dipecah-pecah kemudian disaring sesuai dengan ukuran agregat maksimum yang dibutuhkan. Mutu Beton yang dipakai untuk perencanaan campuran beton terdiri dari dua bagian yaitu kuat tekan karakteristik (f_c') 25 MPa dan f_c' 20 MPa. Perencanaan campuran beton (*mix design*) dengan f_c' 25 MPa terdiri dari 3 variasi. Campuran 1 menggunakan agregat natural semua, campuran 2 menggunakan 50% agregat kasar daur ulang dan agregat halus natural. Sedangkan campuran 3 menggunakan 100% agregat kasar daur ulang dan agregat halus natural. Perencanaan campuran beton dengan f_c' 20 MPa juga terdiri dari 3 variasi. Campuran I menggunakan 100% agregat kasar daur ulang dan agregat halus natural, campuran II menggunakan 80% agregat kasar daur ulang dan 20% agregat halus daur ulang. Sedangkan campuran III menggunakan 60% agregat kasar daur ulang dan 40% agregat halus daur ulang. Kedua mutu beton dengan masing-masing variasi diuji kuat tekan dan kuat tarik belah dengan benda uji silinder pada umur beton 3, 7, 14, 21, dan 28 hari, kemudian diuji kuat geser dengan benda uji balok berukuran $100 \times 100 \times 300 \text{ mm}^3$. Uji lentur dilakukan terhadap 9 balok beton bertulang dan 9 pelat beton bertulang dengan masing-masing 3 buah untuk tiap campuran.

Balok beton bertulang berukuran $200 \times 200 \times 1200 \text{ mm}^3$ dengan $f_c' 25 \text{ MPa}$ dan pelat beton bertulang berukuran $500 \times 120 \times 1200 \text{ mm}^3$ dengan $f_c' 20 \text{ MPa}$.

1.2 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui kuat tekan karakteristik beton dengan merencanakan campuran beton dengan cara *ACI* dan menggunakan agregat daur ulang.
2. Mengetahui perkembangan kuat tekan terhadap umur beton dengan agregat kasar daur ulang dan agregat halus daur ulang.
3. Mengetahui kuat tarik belah dan kuat geser beton daur ulang.
4. Mengetahui kuat lentur balok beton bertulang dengan agregat kasar daur ulang.
5. Mengetahui kuat lentur pelat beton bertulang dengan agregat daur ulang.
6. Mengetahui daktilitas balok beton bertulang dengan agregat kasar daur ulang.
7. Mengetahui daktilitas pelat beton bertulang dengan agregat kasar daur ulang.
8. Membandingkan kuat lentur dan daktilitas balok beton bertulang.
9. Membandingkan kuat lentur dan daktilitas pelat beton bertulang.

1.3 Ruang Lingkup

a) Benda uji silinder dan balok beton bertulang

1. Mutu beton daur ulang 25 MPa
2. Mutu baja tulangan lentur 364 Mpa
3. Mutu baja tulangan geser 394 Mpa
4. Ukuran agregat kasar maksimum 19 mm .
5. Campuran beton terdiri dari 3 variasi:
 - beton dengan agregat natural (campuran 1)
 - beton dengan 50% agregat kasar daur ulang dan agregat halus natural (campuran 2)

- beton dengan 100% agregat kasar daur ulang dan agregat halus natural (campuran 3).
6. Benda uji silinder berjumlah 81 dengan masing-masing 27 silinder tiap variasi campuran.
 7. Balok beton bertulang berjumlah 9 berukuran 200 x 200 x 1200 mm³ dengan bentang pengujian 1050 mm, masing-masing 3 balok tiap variasi campuran.
 8. Balok tanpa tulangan berjumlah 9 dengan ukuran 200 x 200 x 700 mm³ dengan bentang pengujian 600 mm, masing-masing 3 balok tiap variasi campuran.
 9. Benda uji geser balok tanpa tulangan berjumlah 9 dengan ukuran 100 x 100 x 300 mm³ dengan masing-masing 3 balok tiap variasi campuran.
 10. Tulangan lentur bawah 3-D11 dan tulangan atas 2-D11
 11. Tulangan geser d-10 @ 80 mm
 12. Pengujian kuat tekan dan kuat belah dengan *Compression Testing Machine*.
 13. Pengujian kuat lentur dengan UTM.
- b) Benda uji silinder dan pelat beton bertulang
1. Mutu beton daur ulang 20 MPa
 2. Mutu baja tulangan lentur 400 MPa
 3. Ukuran agregat kasar maksimum 25 mm.
 4. Campuran beton terdiri dari 3 variasi:
 - beton dengan 100% agregat kasar daur ulang dan agregat halus natural (campuran I)
 - beton dengan 80% agregat kasar daur ulang dan 20% agregat halus daur ulang (campuran II)
 - beton dengan 60% agregat kasar daur ulang dan 40% agregat halus daur ulang (campuran III).

5. Benda uji silinder berjumlah 81 dengan masing-masing 27 silinder tiap variasi campuran.
6. Benda uji pelat beton bertulang berjumlah 9 dengan ukuran 500 x 120 x 1200 mm³ dengan bentang pengujian 1050 mm, masing-masing 3 pelat tiap variasi campuran.
7. Benda uji geser balok tanpa tulangan berjumlah 9 dengan ukuran 100 x100 x300 mm³ dengan masing-masing 3 balok tiap variasi campuran.
8. Tulangan lentur positif d10 @125 mm dan tulangan atas d5 @187,5 mm.
9. Pengujian kuat tekan dan kuat belah dengan *Compression Testing Machine*.
10. Pengujian kuat lentur dengan UTM.

1.4 Metode Penelitian

Metode penelitian adalah eksperimen di laboratorium.

BAB 2

Studi Pustaka

2.1 Beton Sebagai Bahan Bangunan

Beton adalah bahan bangunan yang paling banyak digunakan pada dunia modern ini. Bangunan dari beton diantaranya gedung, jalan raya, jembatan, jalan kereta api, bendungan, pipa saluran, fondasi, dan lain-lain. Kata beton atau *concrete* berasal dari bahasa latin *concretus* berarti tumbuh bersama atau menggabungkan menjadi satu. Beton adalah bahan komposit yang cukup rumit, terdiri dari agregat berfungsi sebagai bahan pengisi (*filler*) dan pasta semen berfungsi sebagai bahan pengikat (*binder*). Sering ditambahkan bahan kimia (*admixture*) untuk memperbaiki atau mengubah sifat-sifatnya sesuai dengan yang kita inginkan.

Tabel 2.1 Definisi Beton

Beton	= bahan pengisi + bahan pengikat
Beton	= agregat (kasar dan halus) + pasta semen
Mortar	= agregat halus + pasta semen
Pasta semen	= semen + air

Meskipun beton dapat dibuat dengan mudah tetapi dalam merencanakan campuran beton perlu pengetahuan teknologi beton yang cukup untuk menghasilkan beton baik. Pada umumnya beton mempunyai komposisi pasta semen hanya sebesar 20 – 35% terhadap volume total beton tapi sangat memegang peranan penting terutama untuk perbandingan berat antara air/semen. Semakin besar rasio berat air/semen maka semakin berkurang kekuatan beton sedang agregat mengisi volume beton sebesar 65 – 80% . Semen yang digunakan untuk beton mempunyai banyak tipe dan jenisnya dengan komposisi kimiawi yang berbeda. Sedangkan agregat mempunyai ukuran, bentuk, gradasi, kekerasan, berat jenis yang berbeda. Sehingga dalam merencanakan campuran beton perlu diperhatikan sifat-sifat bahan dasar tersebut karena bisa mempengaruhi kekuatan beton. Selain

pengendalian mutu bahan, diperlukan juga pengendalian selama pelaksanaan dan pengendalian perawatan selama masa pengerasan supaya menghasilkan beton berkualitas baik sesuai yang disyaratkan, seragam, dan ekonomis.

Beton mempunyai kuat tekan jauh lebih besar dibandingkan kuat tariknya. Sehingga selalu diperlukan perkuatan tulangan baja pada daerah tariknya menjadi beton bertulang untuk struktur bangunan. Beton bertulang bisa dipakai untuk hampir semua bangunan termasuk struktur yang lebih berat. Sedang beton non-struktural bisa digunakan untuk beton isolasi dan beton arsitektural.

2.2 Sifat Agregat

Kualitas agregat sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat beton segar maupun beton keras karena agregat menempati sekitar 65 - 80% volume beton. Agregat sebagai bahan pengisi (*filler*) bertujuan supaya beton lebih ekonomis, memiliki kestabilan volume, dan tahan lama. Sifat beton keras secara langsung berkaitan dengan sifat agregat seperti modulus elastisitas, kekuatan, dan lain-lain (Tabel 2.2). Agregat dibagi menjadi agregat kasar dan agregat halus dengan batasan butiran berukuran lebih kecil dari 4,75 mm (saringan ASTM no 4) termasuk agregat halus. Agregat halus biasanya menempati sekitar 25 – 65% volume total agregat. Persentase pasir yang banyak menghasilkan beton dengan kepadatan rendah dan membutuhkan air banyak sedangkan persentase pasir yang sedikit atau kelebihan agregat kasar bisa menyebabkan beton keropos.

Sifat-sifat agregat yang diperlukan untuk merencanakan perbandingan campuran beton adalah ukuran, bentuk, gradasi, kadar air, berat jenis relatif, dan berat isi. Agregat dari batuan yang dipecah membutuhkan lebih banyak pasta semen dari pada agregat alami. Jumlah agregat kasar dengan butiran memanjang dan pipih perlu dibatasi karena membutuhkan banyak pasta semen dan lebih sulit dipadatkan sehingga sukar terjadi ikatan antar agregatnya.

Tabel 2.2 Sifat Beton Keras Berkaitan dengan Sifat Agregat

Sifat Beton	Sifat Agregat yang berkaitan
Keawetan	

<ul style="list-style-type: none"> • Ketahanan terhadap pembekuan • Ketahanan terhadap abrasi • Reaksi alkali-agregat 	Kekekalan bentuk, porositas, kuat tarik, tekstur, mineral lempung Kekerasan Mengandung silika reaktif
Kekuatan	Kekuatan, ukuran butir maksimum, tekstur permukaan, kebersihan, bentuk butiran
Susut dan rangkai	Modulus elastisitas, bentuk butiran, gradasi, kebersihan, ukuran butir mak., mineral lempung
Panas jenis	Panas jenis
Berat isi	Berat jenis relatif, gradasi, bentuk butiran, ukuran butir mak.
Modulus elastisitas	Modulus elastisitas, rasio Poisson

Gradasi adalah distribusi ukuran agregat. Gradasi menentukan rasio berat air/semen atau jumlah semen yang digunakan supaya menghasilkan campuran beton yang mudah dikerjakan. Gradasi baik jika susunan butirnya sepadat mungkin dan ruang udaranya minimal sehingga dibutuhkan pasta semen minimal pula. Akibatnya biaya pembuatan beton bisa lebih murah mengingat semen adalah bahan pembuat beton yang paling mahal. Dalam praktek, gradasi dinyatakan dalam suatu angka yang disebut Modululus Kehalusan (FM). Semakin besar angka FM berarti semakin banyak butir berukuran besar. *British Standard* menggunakan gradasi dengan daerah zone 1 – 4 untuk agregat halus, dimana agregat yang masuk daerah zone 1 adalah pasir sangat halus sedangkan zone 4 adalah pasir dengan ukuran besar.

Ukuran maksimum agregat kasar ditentukan oleh pekerjaan pembetonan di lapangan. Ukuran maksimum agregat kasar tidak boleh melebihi $\frac{1}{5}$ dari tebal elemen

beton terkecil yang bersangkutan, juga memperhatikan jarak tulangan. Ukuran maksimum agregat kasar mempengaruhi jumlah kebutuhan air dan semen. Menurut ASTM C125, ukuran maksimum agregat kasar adalah ukuran lubang ayakan terkecil yang dapat dilewati oleh semua butiran sampel agregat. Pembetonan dengan massa besar seperti bendungan bisa menggunakan ukuran agregat 15 cm atau lebih, demikian juga dengan fondasi bisa memakai agregat dengan ukuran 4 – 8 cm. Untuk beton normal digunakan ukuran maksimum agregat kasar 38,1 mm (1 ½ in.) atau lebih kecil.

Kadar air dan daya serap agregat perlu diketahui karena mempengaruhi banyaknya air yang dibutuhkan untuk campuran beton. Agregat kering yang belum jenuh air akan menyerap air dari pasta semen sehingga menurunkan rasio air/semen dari rencana semula. Sebaliknya jika ada air yang melapisi permukaan agregat akan menambah air pada pasta semennya sehingga menaikkan rasio air/semen dan memudahkan pengerjaan beton. Kondisi SSD biasanya dipakai sebagai referensi untuk perencanaan campuran beton. Agregat dalam kondisi SSD (*Saturated Surface Dry*) adalah kondisi dimana pori-pori agregat dalam kondisi jenuh tapi permukaannya kering. Oleh karena itu diperlukan koreksi pada perencanaan campuran beton yang tergantung pada selisih antara kadar air dan daya serap agregat supaya sesuai dengan jumlah yang direncanakan semula.

2.3 Beton Daur Ulang

Beton daur ulang sudah dikenal cukup lama dalam rangka menjawab tantangan akan banyaknya limbah industri konstruksi dan menjaga sumber daya alam. Di beberapa negara agregat alami harganya mahal dan limbah industri harus dikirim ke tempat TPA yang membutuhkan biaya penanganan dan pengangkutannya. Beberapa pengujian beton yang menggunakan agregat daur ulang sudah dilakukan sejak awal 1980. Meskipun ada perbedaan formula yang cukup berarti namun kesimpulan dari pengujian beton daur ulang yang sudah dilakukan perlu dipertimbangkan. Sifat beton dengan agregat daur ulang jika dibandingkan dengan beton yang menggunakan agregat alami antara lain: (a). Kuat tekan menurun sebesar 10% - 30%. (b). Kuat tarik lebih rendah tidak lebih dari 10%. (c). Modulus elastisitas menurun sebesar 10% - 40 % tergantung dari sumber agregat kasarnya. (d). Susut lebih besar 20% - 55% sedangkan *creep* lebih kecil hingga 10% (El-Reedy, 2009).

CMRA (*Construction Materials Recycling association*) adalah salah satu asosiasi yang mempromosikan limbah konstruksi daur ulang. Amerika sendiri sudah melakukan daur

ulang beton sebesar 140 juta ton tiap tahunnya dengan memanfaatkan reruntuhan struktur atau jalan raya. *California Department of General Services* 2011 mengeluarkan peraturan yang cukup ketat dan batasan tentang beton daur ulang berhubung banyaknya limbah beton yang ada. Diantara peraturan dan pembatasan itu menyatakan agregat beton daur ulang atau *Recycled Concrete Aggregates* (RCA) adalah agregat yang terbentuk dari proses pemecahan, pengukuran, pencucian, dan pemilihan dari beton keras yang ada. RCA tidak diijinkan untuk digunakan pada beton struktur tapi dapat diaplikasikan pada beton non struktural seperti batas jalan, *pavement*, *landscape*, dan sejenisnya.

Pusat Komunikasi Publik Kementrian PU baru-baru ini melaporkan bahwa kebutuhan penambahan infrastruktur jalan, khususnya pembangunan dan pemeliharaannya tidak bisa diimbangi oleh kemampuan pemerintah. Saat ini pemerintah hanya mampu mendanai 17% saja. Terkait dengan keterbatasan dana maka diperlukan inovasi baru untuk merehabilitasi jalan. Salah satu alternatifnya adalah menggunakan beton dengan agregat daur ulang. Teknologi daur ulang perkerasan mempunyai beberapa keuntungan yaitu dapat mengembalikan kekuatan perkerasan dan mempertahankan geometrik jalan serta mengatasi ketergantungan akan material baru. Inovasi ini telah dikembangkan oleh Pusat Litbang Jalan dan Jembatan Badan Litbang PU. Saat ini telah banyak ruas jalan yang dibangun dengan perkerasan kaku (*rigid pavement*) berupa perkerasan beton sehingga penggunaan daur ulang limbah beton akan bermanfaat.

2.4 Perencanaan Campuran Beton

Perencanaan campuran (*mix desain*) mempunyai tujuan untuk mendapatkan proporsi masing-masing bahan untuk menghasilkan beton berkualitas dan ekonomis. Bahan tersebut biasanya adalah air, semen, pasir, dan batu pecah untuk beton normal tanpa bahan tambahan. Sebelum perencanaan campuran perlu diketahui beberapa hal penting misalnya jenis struktur, kondisi lingkungan, kuat rencana, jenis semen, kualitas air, sifat agregat, dan lain lain. Sifat agregat meliputi gradasi, kadar air, daya serap, berat jenis relatif, ukuran butir terbesar. Kemudian dapat dihitung dengan metode tertentu seperti: (1). ACI (*American Concrete Institute*) (2). DOE (*British Department of Enviroment*) (3). Nisco Master (Jepang). Perencanaan dengan metode DOE dipakai di Indonesia dan dimuat dalam buku 'Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton' SK.SNI.T-15-1990-03. Hasil proporsi bahan campuran dengan berbagai metode biasanya berdasarkan agregat dalam kondisi SSD, sehingga perlu

dikoreksi lagi mengingat kondisi agregat di lapangan sudah dipastikan tidak dalam kondisi SSD. Berdasarkan hasil *mix design* maka dapat dihitung proporsi masing-masing campuran sesuai dengan jumlah benda uji yang diperlukan.

Dalam penelitian ini, perencanaan campuran beton menggunakan metode ACI 211.1 – 91 untuk beton normal dengan kuat tekan karakteristik sebesar 20 MPa dan 25 Mpa.

2.5 Kuat Tekan Beton

Pada peraturan beton Indonesia yang baru (SNI 03-2847-2002), kekuatan material beton dinyatakan oleh kuat tekan benda uji berbentuk silinder (f_c') dengan satuan Mpa. Perubahan dari K menjadi f_c' atau dari benda uji kubus menjadi silinder, disebabkan karena SNI mengacu pada peraturan ACI 318. Benda uji silinder yang dimaksud memiliki diameter 15 cm, tinggi 30 cm, dan berumur 28 hari.

Benda uji dibuat terutama untuk mengevaluasi apakah campuran beton mencapai kuat rencana. Beton segar yang telah dicetak, perlu perawatan selama 24 jam pertama baru acuan bisa dilepas dan biasanya direndam dalam air. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur beton hari ke 3, 7, 14, 21, dan 28 dengan menggunakan standar ASTM C 39 (*American Society for Testing Material*). Pengujian kuat tekan penting juga untuk memperkirakan kuat yang lain seperti kuat lentur dan kuat tarik beton. Perhitungan kuat tekan beton menggunakan persamaan:

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

dengan:

f_c = Kuat tekan beton (MPa)

P = Beban hancur (N)

A = Luas penampang tertekan rata-rata (mm^2)

2.6 Kuat Tarik Belah Beton

Pengujian kuat tarik belah beton dilakukan dengan memberikan tegangan tarik pada benda uji silinder yang dioperasikan menggunakan alat *Compression Testing Machine (CTM)*.

Kuat tarik beton dapat dihitung dengan persamaan:

$$f_{ct} = \frac{2.P}{\pi.l.d} \quad (2.2)$$

dengan:

f_{ct} = Kuat tarik belah (MPa)

P = Beban hancur (N)

l = Panjang benda uji pada bagian yang tertekan (mm)

d = Diameter benda uji (mm)

2.7 Kuat Geser Beton

Pengujian kuat geser bertujuan untuk mengetahui besaran nilai kekuatan geser dari balok beton kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan secara analitis. Pengujian dilakukan dengan menggunakan CTM dan dihitung memakai persamaan:

$$f_v = \frac{P}{A} \quad (2.3)$$

dengan:

f_v = Kuat geser beton (MPa)

P = Beban hancur (N)

A = Luas penampang (mm^2)

2.8 Kuat Lentur Beton (*Modulus Of Rupture*)

Pengujian kuat lentur menggunakan benda uji balok tanpa tulangan pada umur beton 28 hari. Pembebanan dilakukan pada 1/3 bentang untuk mendapatkan lentur murni.

Kuat lentur beton dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$R = \frac{P L}{b d^2} \quad (2.4)$$

dengan:

R = Kuat lentur (MPa)

P = Beban maksimum (N)

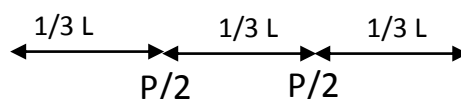
L = Panjang bentang pengujian (mm)

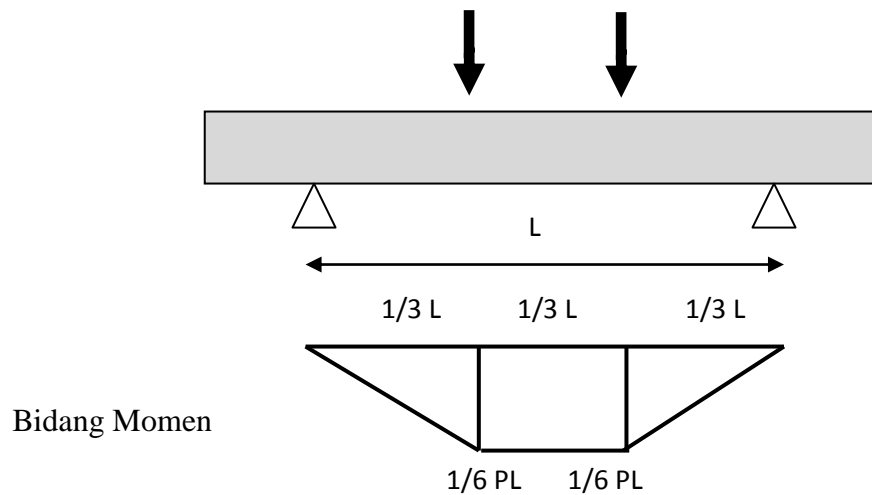
b = Lebar benda uji (mm)

d = Tinggi benda uji (mm)

2.9 Kuat Lentur Balok dan Pelat Beton Bertulang

Lentur pada balok maupun pelat diakibatkan oleh regangan yang timbul karena adanya beban luar. Apabila beban bertambah maka struktur akan mengalami deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan retak disepanjang bentang balok atau pelat. Bila beban semakin bertambah, akhirnya terjadi keruntuhan pada elemen struktur.





Gambar 2.1 Bidang Momen pada *Third Loading Bending Test*

Pada uji kuat lentur balok maupun pelat digunakan sistem pembebanan *third loading bending test* yang dapat dilihat pada Gambar 2.1 dimana pembebanan masing-masing diletakan pada sepertiga dari jarak tumpuan. Pengujian lentur menggunakan alat UTM dengan umur beton 28 hari. Rumus perhitungan momen untuk sistem pembebanan *third loading bending test*.

$$M = \frac{1}{6} PL \quad (2.5)$$

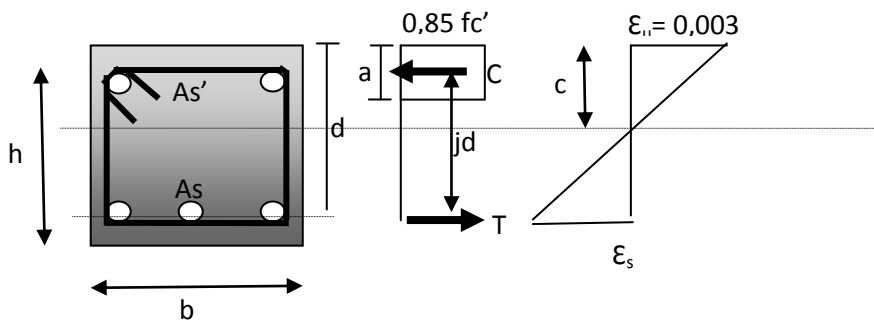
dengan :

M = Momen (kNm)

P = Beban (kN)

L = Panjang Bentang (m)

2.10 Analisis Penampang Persegi Panjang Beton Bertulang



Gambar 2.2 Diagram Tegangan dan Regangan Penampang Persegi Panjang Beton Bertulang

Struktur menerima momen lentur dan gaya geser akibat beban yang bekerja. Pada kondisi seimbang besarnya gaya Tarik (T) pada baja tulangan sama dengan nilai tekan (C) pada beton. Gaya tarik pada tulangan dapat dihitung dengan persamaan :

$$C = T \quad (2.6)$$

$$T = A_s \cdot f_s \quad (2.7)$$

dengan:

T = Gaya Tarik

A_s = Luas Baja Tulangan

f_s = Tegangan Baja

$$C = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \quad (2.8)$$

dengan:

C = Gaya Tekan

f_c' = Kuat Tekan Silinder Beton

a = Tinggi Ekuivalen dari *Rectangular Stress Block*

b = Lebar Penampang

Jarak antara gaya C dan T adalah:

$$J_d = d - 0,5 a \quad (2.9)$$

Momen yang terjadi pada penampang dapat dihitung dengan persamaan:

$$M = T \cdot Jd = C \cdot Jd \quad (2.10)$$

2.11 Evaluasi Kuat Tekan Beton

Perencana struktur biasanya menentukan kuat tekan beton dalam mendesain kekuatan elemen struktur beton bertulang. Kuat tekan itu disebut kuat tekan beton karakteristik atau kuat tekan beton yang disyaratkan f_c' , berdasarkan benda uji silinder diameter 150 mm dan tinggi 300 mm (SNI 03-2834-2002). Karena sifat variabilitas kekuatan beton atau distribusi beton berbentuk lengkung distribusi normal, maka perencana struktur tidak menggunakan hasil kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (f_{cr}'). Sehingga desain campuran harus ditargetkan untuk mencapai kuat tekan rata-rata yang lebih tinggi dari kuat tekan karakteristik. Selisihnya disebut margin kekuatan ($k \cdot s$) yang besarnya ditentukan dari simpangan baku (*standart deviation*), hasil dari produksi beton sebelumnya dan proporsi benda uji yang diijinkan gagal.

$$f_c' = f_{cr}' - k \cdot s \quad (2.11)$$

dengan:

f_c' = Kuat tekan karakteristik (MPa)

f_{cr}' = Kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (MPa)

k = konstanta (=1,64 untuk 5% benda uji yang diijinkan gagal)

s = Simpangan baku (MPa)

Persamaan regresi untuk kuat tekan beton adalah:

$$Y = \frac{x}{a \cdot x + b} \quad (2.12)$$

dimana:

$$a = \frac{\Sigma(xy) - n \cdot x_{rata-rata} \cdot y_{rata-rata}}{\Sigma(x^2) - n \cdot (x_{rata-rata})^2} \quad (2.13)$$

$$b = y_{rata-rata} - a \cdot x_{rata-rata} \quad (2.14)$$

$$y = \frac{x}{F} \quad (2.15)$$

dengan:

Y = Kuat tekan untuk setiap umur beton (MPa)

y = Perbandingan umur beton terhadap kuat tekan rata-rata

n = Jumlah hari pengujian

x = Umur beton (hari)

F = Kuat tekan rata-rata (MPa)

2.12 Daktilitas

Sifat mekanik bahan biasanya dibagi menjadi *ductile materials* dan *brittle materials*. *Ductile materials* adalah bahan yang dapat mulur dengan regangan besar, misal baja dan aluminium. Sedangkan *brittle materials* adalah bahan yang mempunyai regangan kecil, misal beton dan tembaga. Sifat getas beton karena kekuatan tariknya sangat rendah dibandingkan kuat tekannya. Hal ini menjadi kelemahan beton sebagai bahan bangunan sehingga untuk memperkuat dibutuhkan tulangan baja pada daerah tariknya. Bahan dengan daktilitas rendah seperti beton artinya bangunan dapat runtuh tanpa timbulnya regangan besar terlebih dahulu.

BAB 3

Karakteristik Beton

3.1 Pengujian Beton Keras

Beton terdiri dari bahan yang komposit, tidak homogen, unisotropis, dan berasal dari alam sehingga kekuatan beton yang dihasilkan mempunyai kecenderungan bervariasi antara hasil adukan satu dengan lainnya. Maka diperlukan pengawasan terhadap mutu beton dengan mengambil contoh adukan yang kemudian dibuat benda uji silinder. Pengujian beton di lapangan terutama dilakukan untuk pengujian kuat tekan. Untuk mengetahui karakteristik beton lainnya, maka dalam penelitian ini dilakukan pengujian kuat tarik belah, dan pengujian kuat geser balok dengan kuat tekan karakteristik 25 Mpa dan 20 Mpa. Pengujian terhadap lentur dilakukan juga terhadap balok dan pelat, dimana pembahasannya ada dalam bab selanjutnya.

3.2 Pengujian Beton dengan Kuat Tekan Karakteristik 25 Mpa

Pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah dilakukan dengan benda uji silinder. Campuran beton menggunakan semen PCC tipe 1 Tiga Roda, agregat halus/pasir beton, agregat kasar batu pecah alami, dan agregat kasar daur ulang yang diambil dari bekas benda uji di Laboratorium Struktur, dimana ukuran agregat kasar maksimum 19 mm.



Gambar 3.1 Agregat Kasar: Daur Ulang (kiri) dan Alami (kanan)

3.2.1 Benda Uji

Empat jenis pengujian kekuatan dilakukan terhadap benda uji dengan kuat tekan karakteristik beton (f_c') 25 Mpa:

- Benda uji silinder untuk uji kuat tekan dan tarik belah dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pengujian kuat tekan untuk masing-masing variasi campuran berjumlah 15 buah dan pengujian tarik belah untuk masing-masing campuran 1, 2, dan 3 berturut-turut sebanyak 9, 13, dan 15 buah benda uji.
- Balok untuk uji kuat geser dengan ukuran 100 x 100 x 300 mm³ untuk masing-masing variasi campuran berjumlah 3 buah.
- Balok beton bertulang 200 x 120 x 1200 mm³, dengan bentang uji 1050 mm. Benda uji balok untuk masing-masing variasi 3 buah, digunakan untuk menguji kuat lentur dan daktilitas. Baja polos dengan diameter 10 mm digunakan untuk sengkang dan baja ulir berdiameter 11 mm.

3.2.2 Pemeriksaan Agregat dan Perencanaan Campuran dengan $f_c' = 25$ MPa

Pemeriksaan karakteristik agregat halus dan agregat kasar dilakukan terhadap tiga variasi campuran, yaitu campuran 1 dengan 0% RCA (*Recycled Concrete Aggregate*), campuran 2 dengan 50 % RCA, dan campuran 3 dengan 100% RCA. Hasil pemeriksaan agregat menghasilkan data yang berbeda pada setiap campuran sebagai berikut:

Tabel 3.1 Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus

No.	Jenis Pengujian	Satuan	Hasil Pengujian Agregat Halus		
			Campuran 1	Campuran 2	Campuran 3
1	Kadar Air	%	7,820	7,527	9,890
2	Daya serap	%	4,581	3,898	4,167
3	<i>Spesific gravity</i>		2,308	2,552	2,560
4	Modulus kehalusan	%	2,714	2,872	2,946

Tabel 3.2 Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar

No.	Jenis Pengujian	Satuan	Hasil pengujian Agregat kasar		
			Campuran 1 0% RCA	Campuran 2 50% RCA	Campuran 3 100% RCA
1	Kadar Air	%	2,302	3,359	4,715
2	Daya serap	%	2,961	5,404	7,242
3	Berat isi padat	kg/m ³	1507,60	1461,90	1371,98
4	Abrasi	%	20,78	26,30	29,66

Kadar air dan daya serap agregat kasar meningkat seiring meningkatnya persentase agregat kasar alami yang digantikan agregat kasar daur ulang. Sedangkan berat isi menunjukkan penurunan nilai seiring meningkatnya persentase agregat kasar daur ulang. Nilai abrasi pada agregat kasar meningkat yaitu 20,78% untuk campuran 1 dengan 0% RCA (*Recycled Concrete Aggregate*), 26,30% untuk campuran 2 dengan 50% RCA, dan 29,66% untuk campuran 3 dengan 100% RCA. Persentase abrasi tidak lebih dari 45% sehingga material lolos uji abrasi dan dapat dipakai sebagai material beton.

Dari data pemeriksaan karakteristik agregat kasar dan agregat halus dilakukan perencanaan campuran (*mix design*) beton normal dengan metode ACI 211.1 – 91 basis massa untuk mendapatkan proporsi air, semen, agregat halus, dan agregat kasar. Semua campuran membutuhkan air yang sama dalam kondisi agregat SSD yaitu 205 (kg/m³) sehingga dapat dibandingkan antar campurannya. Agregat berasal dari alam sehingga ada selisih antara kadar air dan daya serapnya, oleh karena itu perlu dilakukan koreksi berat air, agregat halus, agregat kasar (Tabel 3.3).

Tabel 3.3 Proporsi Campuran

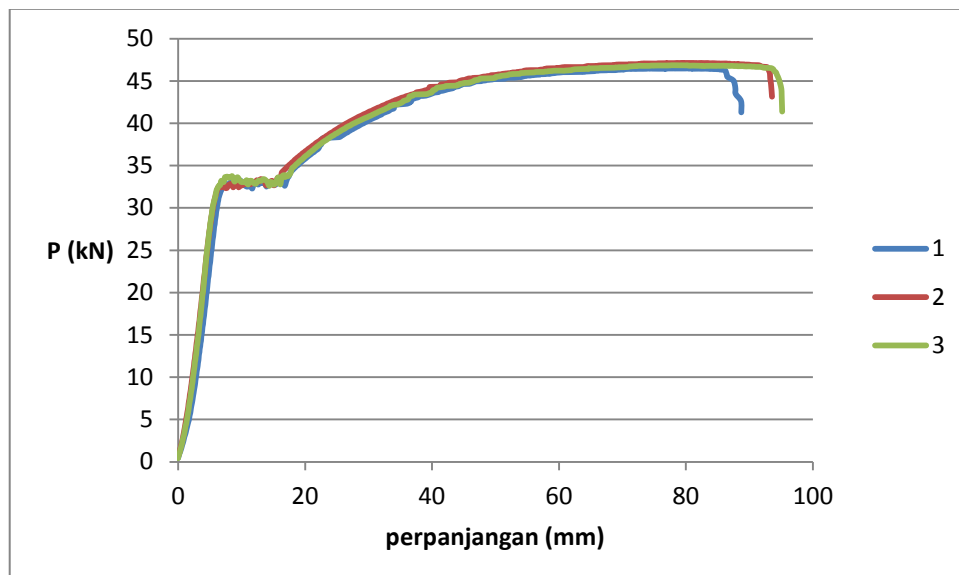
No.	Proporsi campuran (kg/m ³)	Campuran 1 0% RCA	Campuran 2 50% RCA	Campuran 3 100%RCA
-----	--	-------------------------	--------------------------	--------------------------

1	Air Koreksi	188,224	196,169	180,34
2	Semen	418,367	418,367	418,367
3	Agregat kasar	971,652	925,944	869,757
4	Agregat halus	766,756	804,52	876,535

3.2.3 Pemeriksaan Baja Tulangan

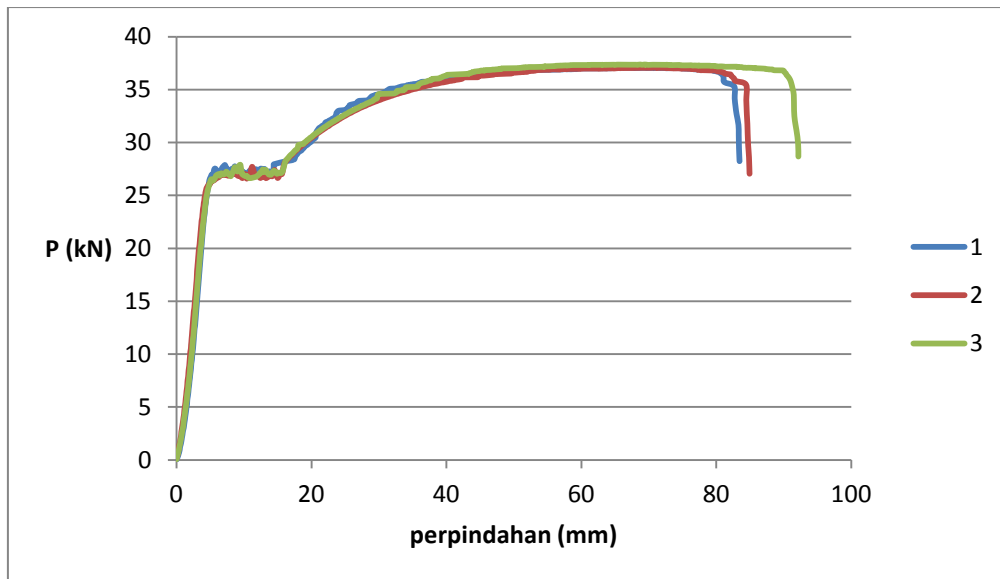
Pemeriksaan baja tulangan dilakukan untuk mengetahui tegangan tarik yang dimiliki oleh baja. Baja polos diameter 10 cm digunakan untuk sengkang balok dan baja ulir diameter 11 cm untuk penulangan balok lainnya. Pengujian dilakukan pada tulangan baja polos maupun tulangan baja ulir. Tegangan tarik tulangan baja dapat diketahui dengan cara membagi beban maksimum dengan luas rata-rata tulangan baja.

Uji Tarik Tulangan Baja Ulir



Gambar 3.2 Hubungan Beban dengan Peralihan Tulangan Baja Ulir

Uji Tarik Tulangan Baja Polos



Gambar 3.3 Hubungan Beban dengan Peralihan Tulangan Baja Polos

Dari Pengujian tulangan baja terlihat bahwa nilai tegangan leleh dan ultimet kurang lebih sama. Hasil pengujian akan diambil nilai rata-ratanya dari ketiga nilai tegangan leleh tulangan baja ulir maupun polos yang untuk selanjutnya digunakan dalam perhitungan. Nilai rata-rata f_y adalah 364 Mpa untuk tulangan ulir dan 394 MPa untuk tulangan polos (Tabel 3.4 dan 3.5).

Tabel 3.4 Pengujian Tarik Tulangan Ulir

Nomor Tulangan	D (mm)	P_y (N)	P_u (N)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
1	10,64	32675	46480	367	523
2	10,64	32258	47140	363	530
3	10,67	32926	46700	368	522
4	10,73	32305	46860	358	519
5	10,63	32098	46150	362	521
6	10,70	32826	45850	365	510

Tabel 3.5 Pengujian Tarik Tulangan Polos

Nomor Tulangan	D (mm)	P_y (N)	P_u (N)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
1	9,35	27062,6	37070	394	540
2	9,35	27107,5	37090	395	540

3	9,35	26923,2	37370	392	545
---	------	---------	-------	-----	-----

Tabel 3.6 Data Uji Baja Tulangan Ulir Balok Beton

Persentase RCA	Kode sampel	Nomor Tulangan	D (mm)	Py (N)	Pu (N)	fy (MPa)	fu (MPa)
0%	1-A	3	10,67	32926	46700	368	522
	1-B	4	10,73	32305	46860	358	519
	1-C	5	10,63	32098	46150	362	521
50%	2-A	3	10,67	32926	46700	368	522
	2-B	5	10,63	32098	46150	362	521
	2-C	6	10,70	32826	45850	365	510
100%	3-A	4	10,73	32305	46860	358	519
	3-B	1	10,64	32675	46480	367	523
	3-C	2	10,64	32258	47140	363	530

3.2.4 Uji Kuat Tekan dengan $f_c' = 25 \text{ Mpa}$

Setelah dilakukan pengadukan campuran, pengujian *slump* dan perawatan beton kemudian dilakukan pengujian kuat tekan pada umur beton 3, 7, 14, 21, dan 28 hari untuk ketiga jenis campuran. Pengujian kuat tekan menggunakan alat *Compression Testing Machine (CTM)* dengan memberi *capping* terlebih dahulu pada permukaan silinder agar beban terdistribusi merata.

Pembebanan dilakukan sampai benda uji hancur atau pada beban maksimum (Gambar 3.4) kemudian dihitung kuat tekan beton dengan persamaan 2.2. Sehingga didapat kuat tekan rata-rata untuk umur beton 3, 7, 14, 21, dan 28 hari (Tabel 3.7, 3.8, dan Tabel 3.9).



Gambar 3.4 Uji Kuat Tekan dengan *Compression Testing Machine*

Tabel 3.7 Data Hasil Uji Kuat Tekan Beton Campuran 1 dengan 0% RCA

No.	Nomor Pembuatan	Umur	D (mm)	L (mm)	W (gr)	Luas Penampang (mm ²)	P (N)	fc (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
1	I-1	3	150,7	300,0	11847	17824,93	199500	11,19	13,47
2	II-2	3	151,4	301,0	12556	17990,96	283400	15,75	
3	III-1	5	150,0	300,3	11968	17671,44	333600	18,88	18,88
4	I-2	7	151,0	301,0	12220	17907,85	309100	17,26	18,63
5	II-2	7	150,5	300,5	12349	17777,63	326300	18,35	
6	III-2	7	150,0	300,0	11904	17671,44	358500	20,29	
7	I-3	14	150,0	300,5	12018	17671,44	352700	19,96	24,88
8	II-4	14	150,8	300,5	12476	17860,44	561000	31,41	
9	III-3	14	150,0	300,3	11965	17671,44	411000	23,26	
10	I-4	21	150,1	300,5	12116	17683,23	421700	23,85	27,29
11	II-5	21	150,0	301,3	12383	17671,44	597100	33,79	
12	III-4	21	150,2	300,8	12180	17706,80	429300	24,24	
13	I-8	28	151,1	300,5	12223	17919,71	466300	26,02	26,19
14	II-8	28	150,0	301,5	12222	17671,44	452700	25,62	
15	III-8	28	150,0	300,0	11822	17671,44	476100	26,94	

Tabel 3.8 Data Hasil Uji Kuat Tekan Beton Campuran 2 dengan 50% RCA

No.	Nomor Pembuatan	Umur	D (mm)	L (mm)	W (gr)	Luas Penampang (mm ²)	P (N)	fc (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
1	IV-1	3	150,4	300,0	11973	17765,82	268300	15,10	16,60

2	V-2	3	151,2	300,5	12078	17955,32	291600	16,24	
3	VI-2	3	150,2	302,0	11956	17706,80	326900	18,46	
4	IV-3	7	150,5	301,0	12175	17789,45	407400	22,90	
5	V-3	7	150,3	301,0	12161	17742,20	495000	27,90	24,68
6	VI-3	7	150,1	301,5	12108	17695,01	411100	23,23	28,80
7	IV-5	14	150,5	303,0	12275	17777,63	473500	26,63	
8	V-5	14	150,2	300,5	12010	17718,60	436000	24,61	
9	VI-6	14	150,3	300,0	12161	17730,40	623400	35,16	34,70
10	IV-8	21	150,1	301,0	12120	17700,91	625100	35,31	
11	V-7	21	150,0	300,8	12049	17671,44	620800	35,13	
12	VI-8	21	150,0	300,3	12213	17659,66	594600	33,67	34,00
13	IV-10	28	150,5	301,0	12218	17789,45	556600	31,29	
14	V-8	28	150,0	301,0	12065	17671,44	586100	33,17	
15	VI-10	28	150,0	300,0	12054	17671,44	663400	37,54	

Tabel 3.9 Data Hasil Uji Kuat Tekan Beton Campuran 3 dengan 100% RCA

No.	Nomor Pembuatan	Umur	D (mm)	L (mm)	W (gr)	Luas Penampang (mm ²)	P (N)	fc (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
1	VII-2	3	150,1	300,8	11948	17695,01	314500	17,77	20,576
2	VIII-2	3	150,3	300,5	11822	17742,20	363700	20,50	
3	IX-2	3	150,3	301,8	11903	17730,40	415900	23,46	
4	VII-4	7	150,0	301,0	11967	17671,44	475400	26,90	26,527
5	VIII-4	7	150,0	300,5	11965	17671,44	438300	24,80	
6	IX-4	7	150,0	300,5	11936	17671,44	492600	27,88	
7	VII-6	14	150,0	300,5	11951	17671,44	544100	30,79	31,596
8	VIII-6	14	150,2	300,0	11839	17706,80	564100	31,86	
9	IX-6	14	150,4	300,0	11951	17765,82	571000	32,14	
10	VII-8	21	150,0	300,8	12020	17671,44	608100	34,41	29,628
11	VIII-8	21	150,0	299,5	11910	17671,44	485400	27,47	
12	IX-8	21	150,2	300,3	11941	17718,60	478500	27,01	
13	VII-9	28	150,0	300,8	12028	17659,66	667700	37,81	36,614
14	VIII-9	28	150,9	300,5	12000	17872,29	577600	32,32	
15	IX-11	28	149,9	300,0	11841	17650,83	701000	39,71	

Hasil kuat tekan rata-rata hari ke 3, 7, 14, 21, dan 28 pengujian kemudian dihitung menggunakan persamaan 2.12 sampai dengan 2.15 sehingga menghasilkan persamaan regresi 3.1, 3.2, dan 3.3. Dari persamaan ini dan persamaan 2.11 didapatkan faktor umur,

kuat tekan beton pada hari ke 28, standar deviasi, dan kuat tekan karakteristik aktual beton (Tabel 3.10, 3.11, dan 3.12).

$$Y_1 = \frac{x}{0,0329649x+0,115516} \quad (3.1)$$

$$Y_2 = \frac{x}{0,025084x+0,109598} \quad (3.2)$$

$$Y_3 = \frac{x}{0,026188x+0,082909} \quad (3.3)$$

Dimana: X = umur beton (hari)

Y = kuat tekan (Mpa)

Tabel 3.10 Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran 1 dengan 0% RCA

No.	Umur (hari)	Kuat Tekan (MPa)		Kuat Tekan Regresi (MPa)	Faktor Umur	Kuat Tekan 28 Hari (MPa)
		Perhitungan	Rata-rata			
1	3	11,19	13,47	13,993	0,52	21,96*
2	3	15,75		13,993	0,52	30,91
3	5	18,88		17,837	0,66	28,90
4	7	17,26	18,63	20,217	0,75	23,24*
5	7	18,35		20,217	0,75	24,71
6	7	20,29		20,217	0,75	27,31
7	14	19,96	24,88	24,265	0,90	22,26*
8	14	31,41		24,265	0,90	35,04
9	14	23,26		24,265	0,90	25,94
10	21	23,85	27,29	26,001	0,96	24,77*
11	21	33,79		26,001	0,96	35,09
12	21	24,24		26,001	0,96	25,18
13	28	26,02	26,19	26,965	1,00	26,02
14	28	25,62		26,965	1,00	25,62

15	28	26,94		26,965	1,00	26,75
Rata-rata						26,91
Standar deviasi						4,040
Kuat tekan karakteristik aktual						20,287

*) Ketidaksempurnaan dalam pengadukan dan pengecoran menghasilkan nilai kuat tekan yang rendah.

Tabel 3.11 Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran 2 dengan 50% RCA

No.	Umur (hari)	Kuat Tekan (MPa)		Kuat Tekan Regresi (MPa)	Faktor Umur	Kuat Tekan 28 Hari (MPa)
		Perhitungan	Rata-rata			
1	3	15,10	16,60	16,230	0,471	32,09
2	3	16,24		16,230	0,471	34,51
3	3	18,46		16,230	0,471	39,23
4	7	22,90	24,68	24,548	0,712	32,18
5	7	27,90		24,548	0,712	39,20
6	7	23,23		24,548	0,712	32,64
7	14	26,63	28,80	30,387	0,881	30,23
8	14	24,61		30,387	0,881	28,06
9	14	35,16		30,387	0,881	39,91
10	21	35,31	34,70	33,004	0,957	36,90
11	21	35,13		33,004	0,957	36,71
12	21	33,67		33,004	0,957	35,19
13	28	31,29	34,00	34,490	1,000	31,29
14	28	33,17		34,490	1,000	33,17

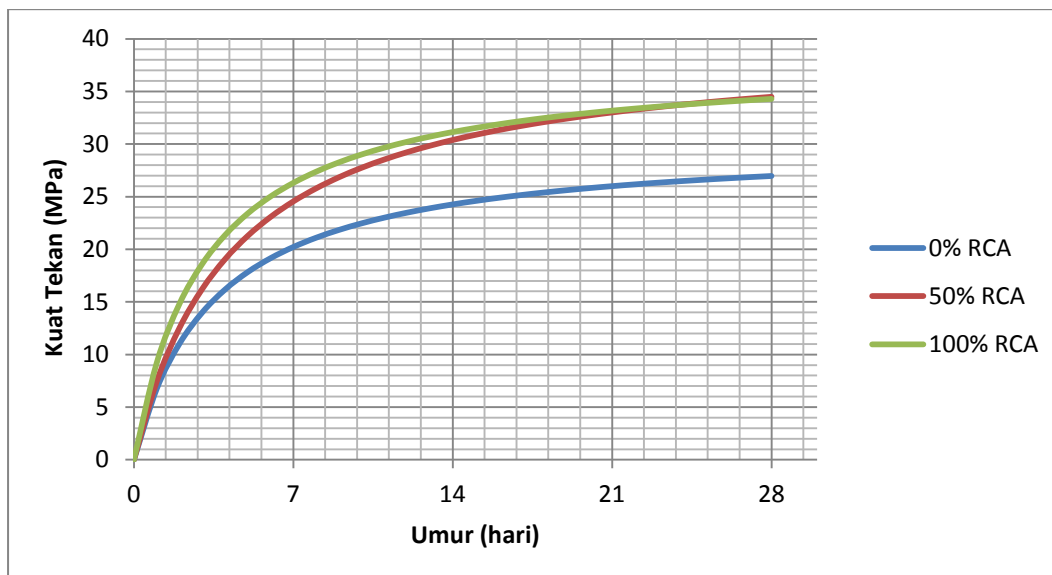
15	28	37,54		34,490	1,000	37,54
Rata-rata						34,59
Standar deviasi						3,590
Kuat tekan karakteristik aktual						28,702

Tabel 3.12 Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran 3 dengan 100% RCA

No.	Umur (hari)	Kuat Tekan (MPa)		Kuat Tekan Regresi (MPa)	Faktor Umur	Faktor Umur Terhadap 28 Hari (MPa)
		Perhitungan	Rata-rata			
1	3	17,77	20,58	18,608	0,543	32,76
2	3	20,50		18,608	0,543	37,78
3	3	23,46		18,608	0,543	43,23
4	7	26,90	26,53	26,309	0,767	35,07
5	7	24,80		26,309	0,767	32,33
6	7	27,88		26,309	0,767	36,33
7	14	30,79	31,60	31,143	0,908	33,90
8	14	31,86		31,143	0,908	35,08
9	14	32,14		31,143	0,908	35,39
10	21	34,41	29,63	33,174	0,967	35,57
11	21	27,47		33,174	0,967	28,39
12	21	27,01		33,174	0,967	27,92
13	28	37,81	36,61	34,293	1,000	37,81
14	28	32,32		34,293	1,000	32,32

15	28	39,71		34,293	1,000	39,72
Rata-rata						34,91
Standar deviasi						3,983
Kuat tekan karakteristik aktual						28,374

Dari persamaan regresi diperoleh perkembangan kuat tekan perhari sehingga dapat dibuat grafik perbandingan kuat tekan terhadap umur beton untuk setiap campuran (Gambar 3.5).



Gambar 3.5 Grafik Perbandingan Kuat Tekan Terhadap Umur Beton

Grafik diatas menunjukkan bahwa beton dengan 50% RCA dan beton dengan 100% RCA memiliki perkembangan kuat tekan yang hampir sama. Mutu beton yang bisa dicapai (kuat tekan karakteristik aktual) dari campuran 2 dan 3 harganya melebihi kuat tekan yang disyaratkan (25 Mpa) sedangkan campuran 1 mutu beton tidak mencapai yang disyaratkan.

3.2.5 Uji Palu Beton dengan $f_c' = 25$ Mpa

Pengujian palu beton menggunakan *Swiss Hammer* untuk mengetahui kuat tekan beton dengan cara indestruktif. Hasil rata-rata pengujian kemudian dikalibrasi menggunakan grafik Lampiran C untuk sudut pengujian -90^0 .

Tabel 3.13 Hasil Uji Palu Beton

Persentase RCA	Rebound Number (N)										Rata-rata	Kuat Tekan*) (MPa)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0%	24	24	25	22	24	24	25	24	27	23	24,2	17,5
	28	24	28	28	25	28	26	25	26	28	26,6	21,0
	26	28	25	23	24	31	29	25	33	27	27,1	22,0
50%	31	26	27	29	28	37	32	28	28	28	29,4	25,0
	41	24	28	31	28	34	30	30	33	28	30,7	27,5
	27	26	30	36	26	25	26	35	27	31	28,9	26,0
100%	28	29	28	28	28	26	26	27	28	28	27,6	23,5
	26	30	28	30	27	29	26	27	27	31	28,1	24,0
	27	28	26	27	29	26	30	26	26	26	27,1	21,5

*) berdasarkan grafik korelasi N dan kuat tekan pada alat

3.2.6 Uji Kuat Tarik Belah dengan $f_c' = 25$ Mpa

Pengujian kuat tarik belah beton menggunakan alat *Compression Testing Machine (CTM)* seperti pada Gambar 3.6. Pembebanan dilakukan sampai benda uji mengalami keretakan dan dicatat beban maksimum yang dicapai selama pengujian. Kuat tarik belah beton dihitung menggunakan persamaan 2.2. Selanjutnya akan didapat kuat tarik belah maksimum untuk masing-masing benda uji dan kemudian dirata-ratakan untuk masing-masing umur pengujian.



Gambar 3.6 Uji Kuat Tarik Belah dengan CTM

Tabel 3.14 Data Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Campuran 1 dengan 0% RCA

No.	Kode Pembuatan	Umur	D (mm)	L (mm)	W (gr)	Luas Penampang (mm ²)	P (N)	fct (MPa)	Kuat Tarik Rata-rata (MPa)
1	II-3	7	151,6	300,5	12581	18050	188500	2,64	2,51
2	III-6	7	150,6	299,5	12167	17813	168200	2,38	
3	I-6	14	150,0	300,0	12043	17671	157500	2,23	2,22
4	I-7	14	150,0	299,5	12035	17671	155600	2,21	
5	I-9	21	151,4	297,5	12110	17991	141600	2,00	2,07
6	II-7	21	150,8	300,3	12381	17860	151800	2,14	
7	I-5	28	150,9	300,5	12187	17884	156300	2,20	2,73
8	II-6	28	149,7	301,0	13317	17589	234300	3,31	
9	III-7	28	150,1	300,8	12133	17683	190900	2,69	

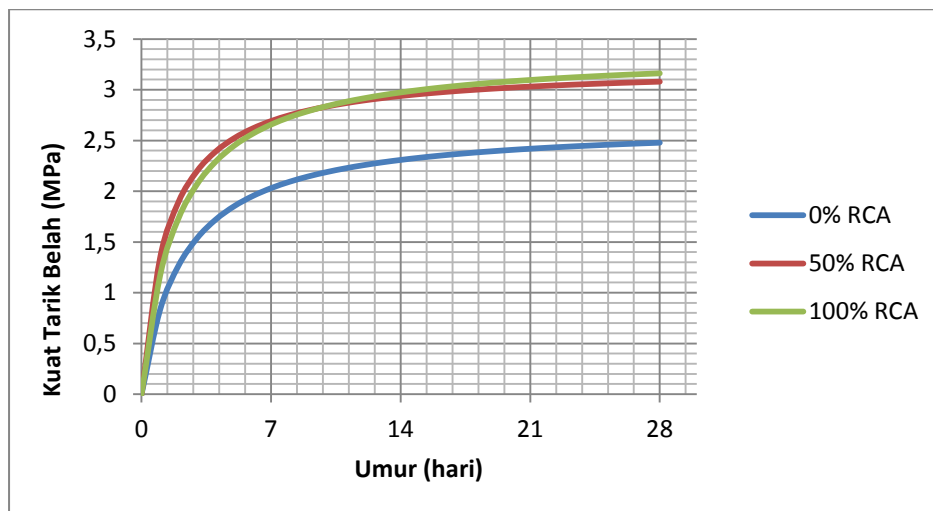
Tabel 3.15 Data Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Campuran 2 dengan 50% RCA

No.	Code Pembuatan	Umur	D (mm)	L (mm)	W (gr)	Luas Penampang (mm ²)	P (N)	fct (MPa)	Kuat Tarik Rata-rata (MPa)
1	IV-2	3	150,2	302,0	12036	17719	147170	2,07	2,04
2	V-1	3	151,5	301,0	12205	18027	144200	2,01	
3	VI-1	3	150,8	302,5	12257	17849	146200	2,04	
4	IV-4	7	151,7	301,3	12213	18062	182700	2,55	2,72
5	VI-4	7	150,3	301,5	12185	17742	205100	2,88	
6	IV-6	14	150,3	301,5	12120	17730	196500	2,76	2,87
7	V-4	14	149,8	300,5	12400	17624	186100	2,63	
8	VI-5	14	150,0	300,0	12048	17671	226300	3,20	
9	IV-7	21	149,8	300,5	12195	17618	242900	3,44	3,29
10	V-6	21	150,1	301,0	12198	17689	238500	3,36	
11	VI-7	21	150,7	300,8	12188	17825	218600	3,07	
12	IV-9	28	150,1	300,5	12004	17695	238700	3,37	2,97
13	V-8	28	150,0	301,3	12140	17671	181800	2,56	

Tabel 3.16 Data Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Campuran 3 dengan 100% RCA

No.	Code Pembuatan	Umur	D (mm)	L (mm)	W (gr)	Luas Penampang (mm ²)	P (N)	fct (MPa)	Kuat Tarik Rata-rata (MPa)
1	VII-1	3	150,2	301,3	11981	17707	150100	2,11	2,02
2	VIII-1	3	150,6	300,5	11936	17801	137300	1,93	
3	IX-1	3	150,2	301,0	11933	17707	142400	2,01	
4	VII-3	10	150,2	300,0	11955	17707	185800	2,63	2,85
5	VIII-3	10	151,1	300,5	12000	17932	194800	2,73	
6	IX-3	10	149,8	302,0	11948	17613	227100	3,20	
7	VII-5	14	150,2	300,5	12010	17707	223200	3,15	2,98
8	VIII-5	14	150,7	300,5	12009	17837	191200	2,69	
9	IX-5	14	150,1	300,5	11908	17695	219400	3,10	
10	VII-7	21	149,8	300,5	11921	17613	212300	3,00	3,13
11	VIII-7	21	150,2	300,5	12012	17707	219300	3,10	
12	IX-7	21	150,3	300,5	12045	17742	232400	3,28	
13	VII-10	28	150,1	301,0	11951	17695	233700	3,29	3,14
14	IX-9	28	149,6	300,8	11900	17583	240000	3,40	
15	IX-10	28	149,1	300,3	11834	17466	192100	2,73	

Kuat tarik rata-rata yang didapatkan, kemudian diregresi menggunakan Persamaan 2.12 sampai dengan 2.15 menghasilkan grafik perkembangan kuat tarik belah setiap harinya untuk setiap variasi campuran (Gambar 3.7).



Gambar 3.7 Grafik Perbandingan Kuat Tarik Belah Beton Terhadap Umur Beton

Dari Gambar terlihat bahwa kuat tarik belah beton menunjukkan nilai kuat tarik belah yang hampir sama untuk beton dengan 50% RCA dan 100% RCA. Sedangkan beton dengan 0% RCA menghasilkan nilai yang rendah seperti nilai kuat tekannya.

Tabel 3.17 Perbandingan Nilai Kuat Tarik Belah Beton dibagi $\sqrt{f_c'}$

Persentase Agregat	f_{ct} (MPa)	f_c' (MPa)	$f_{ct}/\sqrt{f_c'}$
0% RCA	1,83	20,28	0,41
50% RCA	2,56	28,70	0,48
100%RCA	2,81	28,37	0,53

Tabel 3.17 menunjukkan perbandingan dari nilai kuat tarik belah yang dibagi $\sqrt{f_c'}$, koefisien ini merupakan perbandingan terhadap perhitungan teoritis yang menunjukkan $f_{ct} < 0,62\sqrt{f_c'}$. Nilai koefisien dari ketiga campuran beton ini menunjukkan hasil yang nilainya lebih kecil dari 0,62.

3.3 Pengujian Beton dengan Kuat Tekan Karakteristik 20 Mpa

Pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah dilakukan dengan benda uji silinder. Campuran beton menggunakan semen PCC tipe 1 Tiga Roda, agregat halus alami dan agregat halus daur ulang. Sedangkan untuk agregat kasar digunakan agregat batu pecah alami dan agregat kasar daur ulang yang diambil dari bekas benda uji di Laboratorium Struktur, dimana ukuran agregat kasar maksimum 25 mm.

3.3.1 Benda Uji

Empat jenis pengujian kekuatan dilakukan terhadap benda uji dengan kuat tekan karakteristik beton (f_c') 20 Mpa:

- Benda uji silinder untuk uji kuat tekan dan tarik belah dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pengujian kuat tekan dan tarik belah untuk masing-masing variasi campuran berjumlah 27 buah.

- Balok untuk uji kuat geser dengan ukuran 100 x 100 x 300 mm³ untuk masing-masing variasi campuran berjumlah 3 buah.
- Balok beton bertulang 500 x 120 x 1200 mm³, dengan bentang uji 1050 mm. Benda uji balok untuk masing-masing variasi 3 buah, digunakan untuk menguji kuat lentur. Baja polos dengan diameter 10 mm dan tegangan leleh nya 400 Mpa digunakan untuk tulangan tarik. Baja polos dengan diameter 5 mm digunakan untuk tulangan tekan.

3.3.2 Pemeriksaan Agregat dan Perencanaan Campuran dengan $f_c' = 20$ Mpa

Pemeriksaan karakteristik agregat halus dan agregat kasar dilakukan terhadap tiga variasi campuran. Campuran I menggunakan agregat halus alami (0% agregat halus daur ulang) dan 100% agregat kasar daur ulang. Campuran II menggunakan 20% agregat halus daur ulang dan 80% agregat kasar daur ulang. Kemudian campuran III menggunakan 40% agregat halus daur ulang dan 60% agregat kasar daur ulang . Hasil pemeriksaan agregat menghasilkan data yang berbeda pada setiap campuran sebagai berikut:

Tabel 3.18 Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus

No.	Jenis Pengujian	Satuan	Agregat Halus Daur Ulang		
			0%	20%	40%
1	Kadar Air	%	8,11	6,96	8,99
2	Daya serap	%	6,1	11,11	14,62
3	<i>Specific gravity</i>		2,41	2,51	2,15
4	Modulus kehalusan	%	2,9	3,17	2,97

Tabel 3.19 Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar

No.	Jenis Pengujian	Satuan	Agregat kasar Daur Ulang		
			100%	80%	60%
1	Kadar Air	%	6,4	4,44	4,58
2	Daya serap	%	7,91	6,1	7,91
3	<i>Spesific gravity</i>		2,39	2,51	2,4
4	Berat Isi Padat	kg/m ³	1405,55	1392,92	1465,69
5	Abrasi	%	27,36	27,12	24,52

Daya serap agregat halus meningkat seiring meningkatnya persentase penggunaan agregat halus daur ulang. Sedang kadar air agregat kasar meningkat seiring meningkatnya persentase penggunaan agregat kasar daur ulang.

Dari data pemeriksaan karakteristik agregat kasar dan agregat halus dilakukan perencanaan campuran (*mix design*) beton normal dengan metode ACI 211.1 – 91 basis massa untuk mendapatkan proporsi air, semen, agregat halus, dan agregat kasar. Semua campuran membutuhkan air yang sama dalam kondisi agregat SSD yaitu 193 (kg/m³) sehingga dapat dibandingkan antar campurannya. Agregat berasal dari alam sehingga ada selisih antara kadar air dan daya serapnya, oleh karena itu perlu dilakukan koreksi berat air, agregat halus, dan agregat kasar (Tabel 3.18).

Tabel 3.20 Proporsi Campuran

No.	Proporsi campuran (kg/m ³)	Campuran A AHD 0% + AKD 100%	Campuran B AHD20% + AKD 80%	Campuran C AHD 40% + AKD 60%
1	Air Koreksi	190,35	244,18	244,65
2	Air SSD	193	193	193
3	Semen	355,93	355,93	355,93
4	Agregat kasar	987,04	945,59	1000,58
5	Agregat halus	846,68	834,3	778,84

3.3.3 Pemeriksaan Baja Tulangan

Pemeriksaan baja tulangan dilakukan untuk mengetahui tegangan tarik yang dimiliki oleh baja. Pengujian tarik dilakukan pada tulangan baja polos dengan diameter 10 mm kemudian data yang diambil adalah beban maksimum dan beban leleh. Tegangan tarik tulangan baja dapat diketahui dengan cara membagi beban maksimum dengan luas rata-rata tulangan baja.

Tabel 3.21 Pengujian Tarik Tulangan Baja

Benda Uji	Ukuran (mm)				Beban Leleh P_y (N)	Beban Runtuh P_u (N)
	D1	D2	D3	Drata-rata		
1	10,09	10,1	10,1	10,08	34487,05	54680,94
2	10,05	10	10,1	10,05	34148,61	51330,83
3	10,06	10	10	10,05	34207,47	51693,80

3.3.4 Uji Kuat Tekan dengan $f_c' = 20$ Mpa

Setelah dilakukan pengadukan campuran, pengujian *slump* dan perawatan beton kemudian dilakukan uji kuat tekan pada umur beton 3, 7, 14, 21, dan 28 hari sehingga didapat kuat tekan rata-ratanya (Tabel 22, 23, dan 24).

Tabel 3.22 Pengujian Kuat Tekan Beton Campuran I

Benda Uji	Umur Pengujian (Hari)	Ukuran Silinder (cm)						Berat Silinder (Kg)	Beban Total (kN)	Luas Penampang (mm ²)	Tegangan Hancur (MPa)		
		Diameter			Tinggi Silinder						Bacaan Alat	Perhitungan	Rata ²
		D1	D2	Drata-rata	H1	H2	Hrata-rata						
1	3	15,13	15,10	15,12	30,00	30,10	30,05	11,806	236,1	17934,36	13,36	13,16	13,46
2	3	15,14	15,13	15,14	30,00	30,00	30,00	11,898	247,5	17981,86	15,63	13,76	
3	4	15,05	15,07	15,06	30,00	30,10	30,05	11,999	279,7	17804,08	14,01	15,71	
4	7	15,07	15,05	15,06	30,10	30,00	30,05	11,958	350,4	17804,08	19,83	19,68	18,23
5	7	15,09	15,06	15,07	30,30	30,10	30,20	11,932	310,6	17833,65	17,58	17,42	
6	7	15,02	15,01	15,02	30,10	30,30	30,20	11,991	311,2	17697,84	17,61	17,58	
8	13	14,96	14,97	14,96	30,20	30,30	30,25	11,876	369,2	17574,30	20,89	21,01	
9	13	15,08	15,11	15,09	30,00	30,05	30,03	12,250	415,8	17881,01	23,33	23,25	
7	14	15,01	15,00	15,00	30,10	30,20	30,15	12,300	385,8	17662,50	21,83	21,84	21,84
10	21	15,09	14,98	15,03	30,00	30,00	30,00	11,876	438,8	17739,12	24,83	24,74	24,34
11	21	15,14	15,14	15,14	30,15	30,10	30,13	12,012	418,6	17993,74	23,69	23,26	
12	21	14,99	15,05	15,02	30,15	30,05	30,10	12,029	443,2	17709,63	25,08	25,03	
13	28	15,01	15,08	15,04	30,15	30,20	30,18	11,864	593,4	17762,73	33,58	33,41	32,97
14	28	15,04	15,03	15,03	30,10	30,00	30,05	11,909	560,0	17739,12	31,69	31,57	
15	28	15,06	15,08	15,07	30,10	30,00	30,05	11,969	604,4	17815,91	34,20	33,92	

Tabel 3.23 Pengujian Kuat Tekan Beton Campuran II

Benda Uji	Umur Pengujian (Hari)	Ukuran Silinder (cm)						Berat Silinder (Kg)	Beban Total (kN)	Luas Penampang (mm ²)	Tegangan Hancur (MPa)		
		Diameter			Tinggi Silinder						Bacaan Alat	Perhitungan	Rata2
		D1	D2	Drata-rata	H1	H2	Hrata-rata						
1	4	15,11	15,05	15,08	30,00	30,00	30,00	11,848	314,6	17851,40240	17,80	17,6232653	17,2650
2	4	15,01	15,05	15,03	30,10	30,00	30,05	11,804	274,0	17733,22065	15,51	15,4512260	
3	4	15,03	15,09	15,06	30,10	30,20	30,15	11,996	333,3	17804,08260	18,86	18,7204254	
4	7	15,01	14,99	15,00	30,00	30,20	30,10	11,800	336,6	17662,50000	19,05	19,0573248	16,9442
5	7	15,09	14,95	15,02	30,10	30,10	30,10	11,783	357,0	17709,63140	20,20	20,1585223	
6	7	14,98	14,99	14,98	30,00	30,00	30,00	11,971	204,7	17621,31154	11,59	11,6166155	
7	13	15,13	15,08	15,10	30,10	30,05	30,08	11,880	458,7	17898,78500	25,96	25,6274378	23,6163
8	13	15,08	14,97	15,02	30,00	30,05	30,03	11,767	398,9	17709,63140	22,57	22,5244665	
9	13	14,94	14,97	14,96	30,00	30,00	30,00	11,899	435,7	17556,68396	24,65	24,8167593	
10	21	15,04	15,05	15,05	30,10	30,10	30,10	11,860	417,7	17768,63396	23,64	23,5077159	25,6933
11	21	15,04	15,02	15,03	30,20	30,10	30,15	11,795	406,2	17733,22065	22,99	22,9061606	
12	21	15,04	15,08	15,06	30,20	30,10	30,15	12,010	545,8	17798,17204	30,88	30,6660706	
13	28	14,97	14,93	14,95	30,00	30,00	30,00	12,023	543,0	17544,94625	30,73	30,9490831	30,0946
14	28	14,97	15,13	15,05	30,00	30,00	30,00	11,828	543,3	17780,44625	33,07	30,5560385	
15	28	15,07	14,98	15,03	30,20	30,10	30,15	11,911	510,0	17721,42406	28,86	28,7787256	

Tabel 3.24 Pengujian Kuat Tekan Beton Campuran III

Benda Uji	Umur Pengujian (Hari)	Ukuran Silinder (cm)						Berat Silinder (Kg)	Beban Total (kN)	Luas Penampang (mm ²)	Tegangan Hancur (MPa)		
		Diameter			Tinggi Silinder						Bacaan Alat	Perhitungan	Rata2
		D1	D2	Drata-rata	H1	H2	Hrata-rata						
1	4	14,83	14,95	14,89	30,00	30,05	30,03	11,800	247,9	17404,39985	14,03	14,24	15,03
2	4	14,88	15,02	14,95	30,00	30,00	30,00	11,731	310,9	17539,07887	17,60	17,73	
3	4	14,98	15,10	15,04	30,00	30,00	30,00	11,812	233,0	17750,92289	13,18	13,13	
4	6	14,96	15,17	15,07	30,05	30,10	30,08	11,755	316,8	17815,90666	17,93	17,78	16,70
5	6	15,13	15,14	15,13	30,05	30,00	30,03	11,935	276,8	17975,91567	15,66	15,40	
6	6	15,07	15,07	15,07	30,10	30,20	30,15	11,888	301,6	17815,90666	17,07	16,93	
7	14	15,00	15,13	15,06	29,90	30,10	30,00	11,735	336,4	17809,99414	19,03	18,89	21,28
8	14	15,02	15,03	15,03	30,10	30,10	30,10	12,003	464,8	17721,42406	26,30	26,23	
9	14	15,03	15,00	15,01	30,00	30,20	30,10	11,780	331,1	17691,94977	18,73	18,71	
10	21	14,99	14,98	14,99	30,10	30,00	30,05	11,790	368,1	17627,19266	20,83	20,88	23,36
11	21	15,05	14,90	14,98	30,10	30,20	30,15	12,042	468,5	17603,67406	25,51	26,61	
12	21	15,01	15,03	15,02	30,00	30,10	30,05	11,886	399,7	17703,73654	22,62	22,58	
13	28	15,03	15,02	15,02	30,20	30,10	30,15	11,778	361,4	17715,52724	20,45	20,40	24,80
14	28	15,05	15,01	15,03	30,00	30,00	30,00	11,724	416,1	17727,32187	23,55	23,47	
15	28	15,02	15,03	15,02	30,10	30,00	30,05	11,889	492,2	17715,52724	27,85	27,78	
16	28	14,97	15,03	15,00	30,20	30,10	30,15	11,845	486,3	17650,72696	27,52	27,55	

Dari hasil kuat tekan rata-rata hari ke 3, 7, 14, 21, dan 28 pengujian didapatkan persamaan regresi untuk campuran A, B, dan C. Dari persamaan ini dihasilkan faktor umur, kuat tekan beton pada hari ke 28, standar deviasi, dan kuat tekan karakteristik aktual beton (Tabel 3.25, 3.26, dan 3.27).

$$\text{Regresi untuk Campuran A, } Y_1 = \frac{x}{0,02762493x+0,18794732}$$

$$\text{Regresi untuk Campuran B, } Y_2 = \frac{x}{0,028540098x+0,171915357}$$

$$\text{Regresi untuk Campuran C, } Y_3 = \frac{x}{0,0357985x+0,1396035}$$

Dimana: X = umur beton (hari)

Y = kuat tekan (Mpa)

Tabel 3.25 Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran I

Benda Uji	Umur Pengujian (hari)	Kuat Tekan (MPa)		Kuat Tekan Regresi (MPa)	Faktor Umur	Estimasi Kuat Tekan 28 hari
		Perhitungan	Rata ²			
1	3	13,16	13,46	11,08	0,38	34,61
2	3	13,76		11,08	0,38	36,19
3	4	15,71		15,71	13,40	0,46
4	7	19,68	18,23	18,36	0,63	31,22
5	7	17,42		18,36	0,63	27,63
6	7	17,58		18,36	0,63	27,90
8	13	21,01	22,13	23,76	0,82	25,75
9	13	23,25		23,76	0,82	28,50
7	14	21,84	21,84	24,36	0,84	26,11
10	21	24,74	24,34	27,34	0,94	26,35
11	21	23,26		27,34	0,94	24,78
12	21	25,03		27,34	0,94	26,66
13	28	33,41	32,97	29,12	1,00	33,41
14	28	31,57		29,12	1,00	31,57
15	28	33,92		29,12	1,00	33,92
Rata-rata						29,91
Deviasi Standar						3,82
Kuat Tekan Karakteristik (MPa)						23,64

Tabel 3.26 Kuat Tekan Karakteristik Beton Campuran II

Benda Uji	Umur Pengujian (hari)	Kuat Tekan (MPa)		Kuat Tekan Regresi (MPa)	Faktor Umur	Estimasi Kuat Tekan 28 hari
		Perhitungan	Rata ²			
1	4	17,62	17,26	13,98	0,48	36,34
2	4	15,45		13,98	0,48	31,86
3	4	18,72		13,98	0,48	38,61
4	7	19,06	16,94	18,83	0,65	29,18
5	7	20,16		18,83	0,65	30,87
6	7	11,62		18,83	0,65	17,79
7	13	25,63	23,62	23,94	0,83	30,86
8	13	22,52		23,94	0,83	27,13
9	13	24,82		23,94	0,83	29,89
10	21	23,51	25,69	27,23	0,94	24,90
11	21	22,91		27,23	0,94	24,26
12	21	30,67		27,23	0,94	32,48
13	28	30,95	30,09	28,84	1,00	30,95
14	28	30,56		28,84	1,00	30,56
15	28	28,78		28,84	1,00	28,78
Rata-rata						29,63
Deviasi Standar						4,95
Kuat Tekan Karakteristik (MPa)						21,51

Tabel 3.27 Kuat Tekan Karakteristik Campuran III

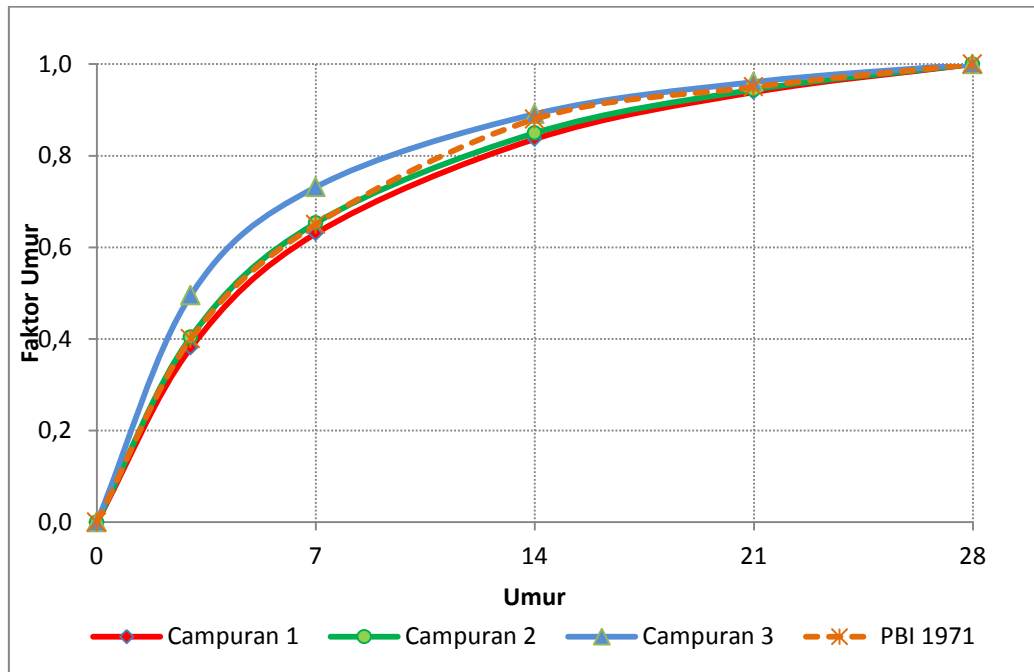
Benda Uji	Umur Pengujian (hari)	Kuat Tekan (MPa)		Kuat Tekan Regresi (MPa)	Faktor Umur	Estimasi Kuat Tekan 28 hari
		Perhitungan	Rata ²			
1	4	14,24	15,03	14,14	0,58	24,69
2	4	17,73		14,14	0,58	30,73
3	4	13,13		14,14	0,58	22,75
4	6	17,78	16,70	16,93	0,69	25,75
5	6	15,40		16,93	0,69	22,30
6	6	16,93		16,93	0,69	24,52
7	14	18,89	21,28	21,85	0,89	21,20
8	14	26,23		21,85	0,89	29,43
9	14	18,71		21,85	0,89	21,00
10	21	20,88	23,36	23,56	0,96	21,73
11	21	26,61		23,56	0,96	27,70
12	21	22,58		23,56	0,96	23,50
13	28	20,40	24,80	24,52	1,00	20,40
14	28	23,47		24,52	1,00	23,47
15	28	27,78		24,52	1,00	27,78
16	28	27,55		24,52	1,00	27,55
Rata-rata						24,66
Deviasi Standar						3,19
Kuat Tekan Karakteristik (MPa)						19,43

Dari hasil percobaan menunjukan bahwa mutu beton yang dapat dicapai (kuat tekan karakteristik aktual) dari campuran I dan II melebihi kuat tekan yang disyaratkan, sedang campuran III mutu betonnya tidak mencapai yang di disyaratkan (20 Mpa). Kuat tekan mengalami penurunan seiring dengan besarnya jumlah agregat halus alami yang diganti oleh agregat halus daur ulang.

Dari gambar 3.8 terlihat bahwa angka perkembangan kuat beton dengan komposisi 60% agregat kasar daur ulang dan 40% agregat halus daur ulang lebih tinggi pada umur 3-7 hari daripada perkembangan umur beton normal sesuai ketentuan PBI (Peraturan Beton Bertulang Indonesia) 1971.

Tabel 3.28 Faktor Umur Kuat Beton

Umur	Kuat Tekan Hasil Regresi (MPa)			Faktor Umur			
	Campuran 1	Campuran 2	Campuran 3	Campuran 1	Campuran 2	Campuran 3	PBI 1971
3	11,08	11,65	12,15	0,38	0,40	0,50	0,40
7	18,36	18,83	17,94	0,63	0,65	0,73	0,65
14	24,36	24,50	21,85	0,84	0,85	0,89	0,88
21	27,34	27,23	23,56	0,94	0,94	0,96	0,95
28	29,12	28,84	24,52	1,00	1,00	1,00	1,00



Gambar 3.8 Perkembangan Kuat Tekan Beton

3.3.5 Uji Palu Beton dengan $f_c' = 20$ Mpa

Tabel 3.29 Kuat Tekan Hammer Test

Hammer Test	Rebound Number										Rebound Number	Kuat Tekan (kg/cm ²)	Kuat Tekan Hammer Test (MPa)	Kuat Tekan Uji Silinder (MPa)	Kalibrasi
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
I-A7	27	26	24	26	25	25	24	25	24	27	25	185,7	18,22	33,41	1,83382
I-B8	29	23	25	24	24	20	23	25	25	24	24	171,4	16,81	31,57	1,87748
I-C8	27	25	26	24	25	24	24	24	25	26	25	185,7	18,22	33,92	1,86224
II-A4	31	27	24	24	26	25	23	23	26	29	26	200,0	19,62	30,95	1,57743
II-B8	26	31	28	28	26	22	24	26	28	27	26	200,0	19,62	30,56	1,55739
II-C9	24	22	24	29	24	22	20	25	22	19	23	157,1	15,41	28,78	1,86735
III-A8	36	22	22	25	28	30	22	22	29	26	26	200,0	19,62	20,40	1,03976
III-A9	20	22	26	22	23	21	20	22	24	20	22	142,8	14,01	23,47	1,67555
III-C9	22	22	22	24	25	22	23	24	23	21	23	157,1	15,41	27,78	1,80278
III-C10	23	24	22	23	23	25	23	22	22	23	23	157,1	15,41	27,55	1,78771
													Kalibrasi Rata-rata		1,68815

Uji Palu beton dilakukan pada silinder beton yang akan diuji kuat tekan pada umur 28 hari, sehingga kuat tekan yang didapat dari *hammer test* dapat dibandingkan dengan uji kuat tekan silinder. Kuat tekan rata-rata yang didapat dari *hammer test* lebih rendah dan perlu dikalibrasi dengan hasil uji tekan yang didapat dari uji kuat tekan dengan alat *Compression Machine*. Nilai kalibrasi yang didapat dapat dilihat pada tabel di atas.

3.3.6 Kuat Tarik Belah dengan $f_c' = 20 \text{ Mpa}$

Pengujian kuat tarik belah silinder akan menghasilkan data berupa besar gaya yang menyebabkan keruntuhan pada benda uji silinder. Uji kuat tarik belah beton dilakukan pada 33 buah benda uji silinder yang terdiri dari 3 variasi campuran yaitu 11 buah benda uji untuk setiap variasi. Silinder diuji pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Uji tarik belah dilakukan dengan menggunakan *Compression Machine* dengan metode ASTM C496/C 496M – 04 (Tabel 3.30, 3.31, dan 3.32).

Gambar 3.9 merupakan hubungan kuat tarik belah terhadap pertambahan umur dari ketiga variasi campuran dari beton daur ulang. Sedangkan Gambar 3. 10 menunjukkan perbandingan dari nilai kuat tarik belah yang dibagi $\sqrt{f_c'}$, koefisien ini merupakan perbandingan terhadap nilai yang digunakan dalam perhitungan disain teoritis sebesar $f_{ct} < 0,62\sqrt{f_c'}$. Nilai koefisien dari ketiga campuran beton ini menunjukkan hasil yang nilainya kurang dari 0,62.

Tabel 3.30 Data Hasil Uji Kuat Tarik Belah Beton Campuran I

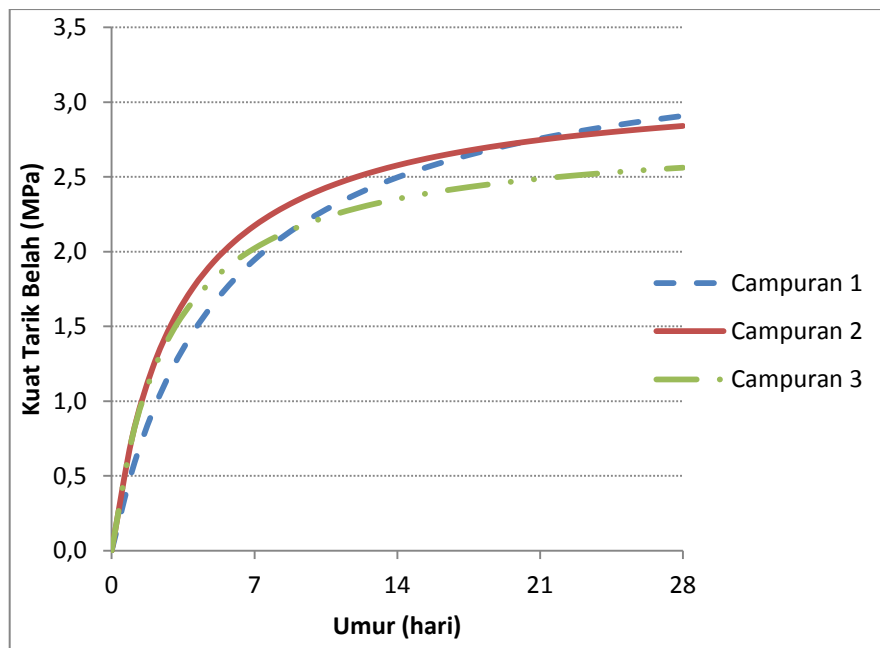
Benda Uji	Umur Pengujian (Hari)	Ukuran Silinder (cm)						Berat Silinder (Kg)	Beban Total (kN)	Luas Penampang (mm ²)	Kuat Tarik Belah (MPa)			
		Diameter			Tinggi Silinder						Aktual	Perhitungan	Rata2	
		D1	D2	Drata-rata	H1	H2	Hrata-rata							
1	3	15,00	15,00	15,00	30,10	30,10	30,10	11,796	109,3	17662,50000	1,547	1,5419232	1,5361	
2	3	15,18	15,18	15,18	30,10	30,00	30,05	11,750	109,6	18088,94340	1,544	1,5303637		
3	7	15,03	15,04	15,03	30,00	30,00	30,00	11,900	162,5	17739,12042	2,299	2,2950981		
4	7	15,02	15,05	15,04	30,30	30,10	30,20	11,843	121,3	17745,02116	1,716	1,7015737	1,9983	
6	13	14,98	15,19	15,08	30,15	30,00	30,08	11,948	162,2	17857,32179	2,294	2,2775726	2,2776	
5	14	14,95	14,95	14,95	30,10	30,20	30,15	11,060	159,2	17539,07887	2,252	2,2500260	2,2500	
7	21	15,02	15,04	15,03	30,10	30,15	30,13	11,920	188,0	17727,32187	2,659	2,6451141	2,7615	
8	21	15,02	14,98	15,00	30,10	30,10	30,10	11,997	204,0	17662,50000	2,886	2,8778805		
9	28	15,06	15,09	15,08	30,00	30,00	30,00	12,002	227,6	17839,56656	3,220	3,2054871		
10	28	15,08	15,02	15,05	29,90	30,00	29,95	11,958	188,6	17774,53962	2,668	2,6655133	3,0346	
11	28	15,07	14,99	15,03	30,10	20,00	25,05	11,921	191,1	17733,22065	2,704	3,2329153		

Tabel 3.31 Data Hasil Uji Kuat Tarik Belah Beton Campuran II

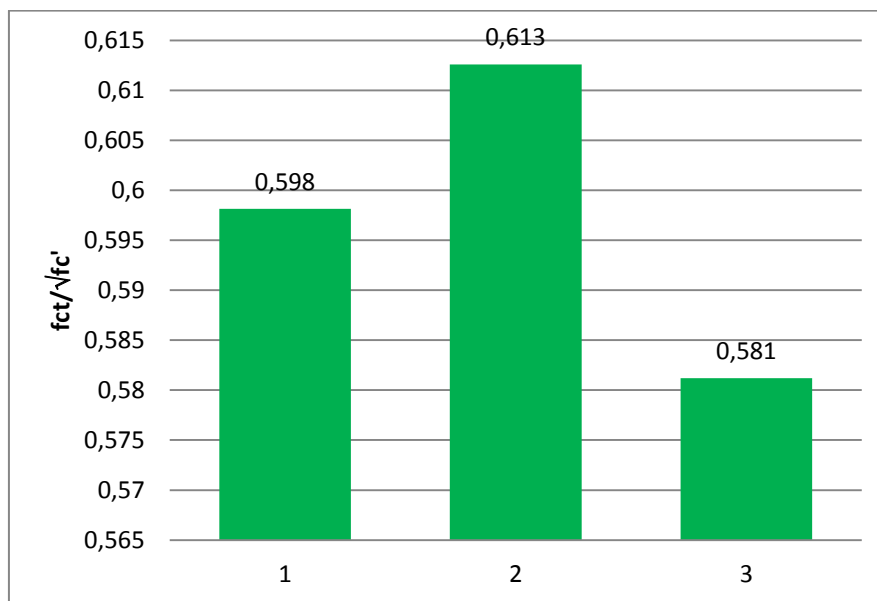
Benda Uji	Umur Pengujian (Hari)	Ukuran Silinder (cm)						Berat Silinder (Kg)	Beban Total (kN)	Luas Penampang (mm ²)	Kuat Tarik Belah (MPa)			
		Diameter			Tinggi Silinder						Aktual	Perhitungan	Rata2	
		D1	D2	Drata-rata	H1	H2	Hrata-rata							
1	4	15,02	15,05	15,04	30,00	30,10	30,05	11,944	135,7	17745,02116	1,919	1,9130763	1,9019	
2	4	15,07	15,07	15,07	30,00	30,10	30,05	11,916	134,4	17821,82017	1,901	1,8906622		
3	7	15,02	15,04	15,03	30,20	30,00	30,10	11,935	112,4	17727,32187	1,590	1,5827540		
4	7	15,13	15,16	15,15	30,00	30,00	30,00	11,915	158,3	18005,62546	2,239	2,2191708	1,9010	
5	13	15,01	15,14	15,08	30,00	30,10	30,05	12,005	219,9	17839,56656	3,111	3,0918882		
6	13	15,03	15,19	15,11	30,10	30,00	30,05	11,865	160,6	17916,56967	2,272	2,2532470		
7	21	15,02	15,04	15,03	30,30	30,15	30,23	11,930	192,5	17733,22065	2,723	2,6990181	2,8484	
8	21	15,08	14,97	15,03	30,00	30,10	30,05	11,957	212,5	17721,42406	3,006	2,9977839		
9	28	15,08	15,12	15,10	30,10	30,10	30,10	12,031	190,5	17892,85874	2,695	2,6700770		
10	28	14,97	15,04	15,01	30,10	30,10	30,10	11,893	198,1	17674,27696	2,805	2,7937165	2,7768	
11	28	15,01	15,00	15,01	30,20	30,10	30,15	11,740	203,6	17674,27696	2,881	2,8665189		

Tabel 3.32 Data Hasil Uji Kuat Tarik Belah Beton Campuran III

Benda Uji	Umur Pengujian (Hari)	Ukuran Silinder (cm)						Berat Silinder (Kg)	Beban Total (kN)	Luas Penampang (mm ²)	Kuat Tarik Belah (MPa)		
		Diameter			Tinggi Silinder						Bacaan Alat	Perhitungan	Rata2
		D1	D2	Drata-rata	H1	H2	Hrata-rata						
1	4	15,01	15,03	15,02	30,10	30,20	30,15	11,862	121,2	17703,7365	1,715	1,7049750	1,6579
2	4	14,91	14,92	14,91	30,10	30,05	30,08	11,700	113,4	17451,1859	1,604	1,6107574	
3	6	14,99	14,98	14,99	30,05	30,00	30,03	11,734	133,2	17627,1927	1,885	1,8856662	
4	6	15,04	15,06	15,05	30,00	30,10	30,05	11,902	154,0	17780,4463	2,179	2,1689028	2,0273
5	14	14,98	15,04	15,01	30,10	30,10	30,10	11,795	169,8	17680,1669	2,402	2,3942152	
6	14	15,05	15,13	15,09	30,00	30,10	30,05	11,735	166,8	17863,2422	2,360	2,3437247	
7	21	15,06	15,13	15,10	30,10	30,10	30,10	11,947	194,7	17886,9335	2,755	2,7293969	2,4321
8	21	15,03	15,00	15,01	30,10	30,20	30,15	11,845	151,7	17691,9498	2,146	2,1347430	
9	28	15,05	14,90	14,98	30,10	30,00	30,05	11,815	171,7	17603,6741	2,429	2,4302969	
10	28	14,93	14,90	14,92	30,00	30,00	30,00	11,641	178,1	17462,8922	2,519	2,5352439	2,5847
11	28	15,01	15,02	15,02	30,20	30,10	30,15	11,781	198,2	17697,8427	2,804	2,7886329	



Gambar 3.9 Hubungan Kuat Tarik Belah Beton terhadap Pertambahan Umur



Gambar 3.10 Perbandingan Nilai Kuat Tarik Belah dibagi $\sqrt{f_c'}$

3.3.7 Uji Kuat Geser Balok dengan $f_c' = 20$ Mpa

Pengujian kuat geser bertujuan untuk mengetahui besaran nilai kekuatan geser dari balok beton, kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan secara analisis. Pada uji geser balok digunakan sistem pembebanan *single point loading* dimana pembebanan diletakan pada bagian tengah dari balok beton yang diuji dengan menggunakan mesin CTM (Gambar 3.11).



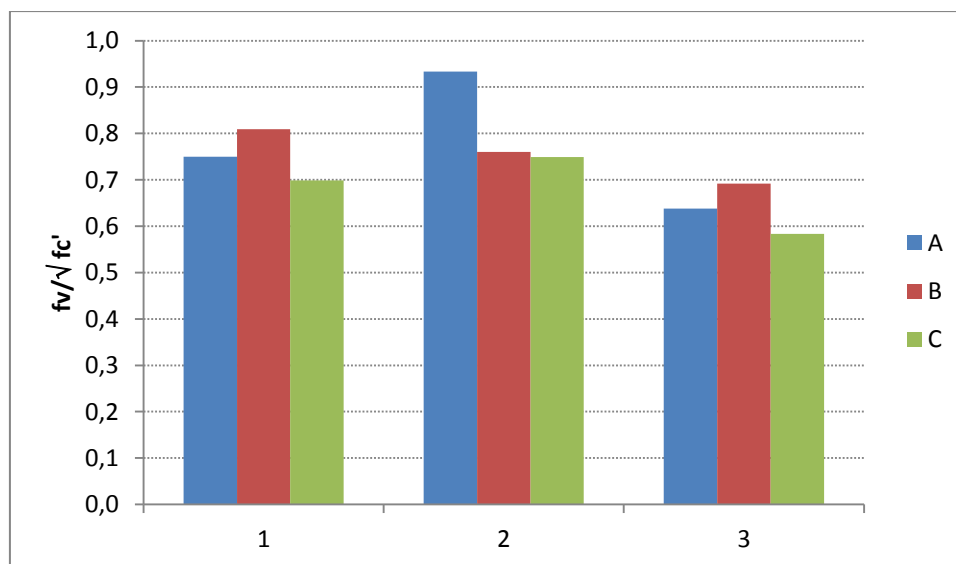
Gambar 3.11 Benda Uji Kuat Geser

Nilai kuat geser beton dari hasil percobaan dapat dilihat dari Tabel 3.33. Sedangkan Gambar 3.11 menunjukkan perbandingan dari nilai kuat geser yang dibagi $\sqrt{f'_c}$, nilai ini dicari sebagai perbandingan terhadap nilai yang biasa digunakan dalam perhitungan teoritis $f_v < \frac{1}{6}\sqrt{f'_c}$. Nilai koefisien dari ketiga campuran beton ini menunjukkan hasil yang nilainya lebih dari $\frac{1}{6}$, maka beton dengan agregat kasar daur ulang dari eksperimen ini dianggap aman menggunakan koefisien $\frac{1}{6}$ dalam disain kuat geser.

Tabel 3.33 Hasil Kuat Geser Beton dengan Agregat Daur Ulang

Kode	Ukuran (cm)		Beban Hancur (kN)	Kuat Geser (MPa)	Koefisien
	b	D			
1A	10,1	10,1	37,30	3,645	

					0,750
1B	10,1	10,2	40,50	3,935	0,809
1C	10,1	10,1	34,70	3,398	0,699
2A	10	10,3	44,60	4,330	0,934
2B	10	10,3	36,30	3,524	0,760
2C	10	10,3	35,80	3,476	0,749
3A	10,1	10,1	28,70	2,813	0,638
3B	10,1	10	30,80	3,050	0,692
3C	10,2	10,1	26,50	2,572	0,584



Gambar 3.12 Perbandingan Nilai Kuat Geser dibagi $\sqrt{f_c'}$

BAB 4

Perilaku Balok Beton Bertulang Daur Ulang

4.1 Pengujian Kuat Lentur Balok Tanpa Tulangan

Pengujian kuat lentur balok dilakukan terhadap 9 balok beton tanpa tulangan dengan ukuran $200 \times 200 \times 700 \text{ mm}^3$, masing-masing 3 balok untuk setiap campuran. Dimana sebelumnya beton dengan campuran yang sama telah dilakukan pengujian tekan, tarik belah, dan geser. Semua balok beton menggunakan bahan dasar semen PCC tipe I dan agregat halus alami. Sedangkan agregat kasar alami 100% digunakan untuk campuran 1, agregat kasar daur ulang 50% digunakan untuk campuran 2, dan agregat kasar daur ulang digunakan pada campuran 3, dimana semua campuran direncanakan dengan $f_c' = 25 \text{ Mpa}$. Pengujian kuat lentur balok menggunakan alat *UTM* pada umur beton 28 hari dengan pembebanan *third point loading*.

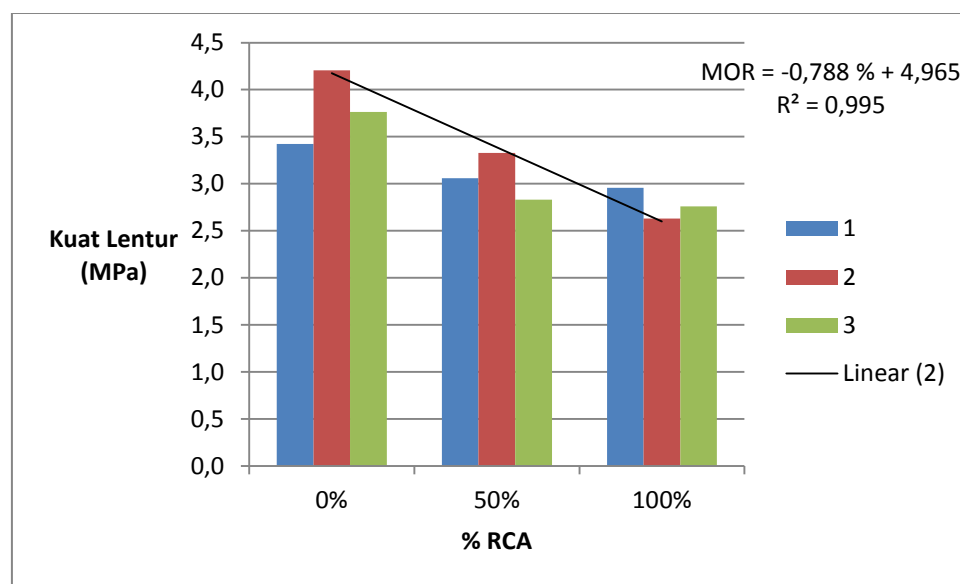


Gambar 4.1 Pengujian Lentur Balok Beton Tanpa Tulangan dengan *UTM*

Besarnya beban maksimum yang dapat diterima oleh balok dibandingkan dengan hasil perhitungan secara analisis. Perhitungan kuat lentur balok beton tanpa tulangan menggunakan Persamaan 2.4 (Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Tanpa Tulangan

Persentase RCA	Kode sampel	b (mm)	d (mm)	L (mm)	Beban Hancur (N)	Modulus of Rupture (MPa)	Modulus of Rupture Rata-rata (MPa)
0%	1-A	206,5	190,0	700,0	36436	3,421	3,797
	1-B	199,5	202,0	703,0	48706	4,206	
	1-C	200,0	205,0	702,5	45031	3,764	
50%	2-A	201,0	201,5	700,0	35672	3,060	3,073
	2-B	201,0	201,5	700,0	38808	3,329	
	2-C	201,0	204,0	700,0	33810	2,829	
100%	3-A	199,0	210,0	700,0	37044	2,955	2,781
	3-B	199,0	199,0	700,0	29596	2,629	
	3-C	201,0	203,0	700,0	32634	2,758	



Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Kuat Lentur Balok Tanpa Tulangan

Dari tabel dan grafik hasil uji kuat lentur terlihat bahwa terjadi penurunan kuat lentur balok seiring dengan semakin banyaknya persentase agregat kasar daur ulang yang dipakai.

Tabel 4.2 Perbandingan Nilai Kuat Lentur Beton dibagi $\sqrt{f_c'}$

Persentase Agregat Kasar	Modulus of Rupture Rata-rata (MPa)	f_c' (MPa)	$R/\sqrt{f_c'}$
0% RCA	3,797	20,28	0,843
50% RCA	3,073	28,7	0,574
100%RCA	2,781	28,37	0,522

Tabel 4.2 menunjukkan perbandingan dari nilai kuat tarik yang dibagi $\sqrt{f_c'}$, koefisien ini merupakan perbandingan terhadap perhitungan teoritis campuran 1 dengan 0% RCA yang menunjukkan $R > 0,62\sqrt{f_c'}$. Nilai koefisien beton 50% RCA dan 100% RCA menunjukkan hasil yang nilainya lebih kecil dari 0,62.

4.5 Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

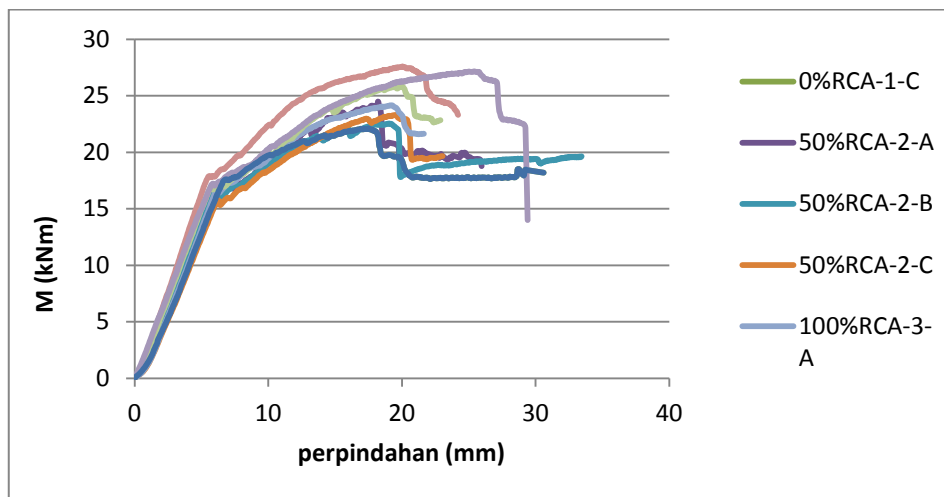
Pengujian kuat lentur balok dilakukan terhadap 9 balok beton bertulang dengan ukuran $200 \times 200 \times 1200 \text{ mm}^3$, masing-masing 3 balok untuk setiap campuran. Perencanaan campuran untuk balok beton bertulang sama seperti campuran untuk balok tanpa tulangan. Pengujian menggunakan pembebanan *third point loading* dengan bentang pengujian 1050 mm dan jarak antar beban terpusat 350 mm dengan menggunakan *UTM*. Selama pengujian retak yang terjadi pada benda uji diberi tanda dan beban maksimumnya dicatat. (Tabel 4.2).



Gambar 4.3 Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang dengan *UTM*

Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

Persentase Agregat Kasar	Kode sampel	b (mm)	d (mm)	L (mm)	Beban <i>Ultimate</i> (N)
0%	1-A	200,5	208,0	1203,0	123150
	1-B	198,0	206,0	1202,0	139940
	1-C	198,0	207,0	1202,0	126380
50%	2-A	205,0	203,0	1202,0	128830
	2-B	205,0	202,0	1203,0	133140
	2-C	201,0	205,0	1203,0	138040
100%	3-A	210,0	205,0	1205,0	157690
	3-B	208,0	208,5	1202,0	147540
	3-C	210,0	198,0	1203,0	155190



Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

Tabel 4.4 Perbandingan Nilai Kuat Lentur Balok Bertulang Hasil Pengujian dan Hasil Perhitungan

Persentase Agregat Kasar	Kode sampel	Py (kN)	Pu (kN)	Hasil Pengujian		Hasil Perhitungan	
				My (kNm)	Mu (kNm)	My (kNm)	Mu (kNm)
0%	1-A	88,79	123,15	15,54	21,55	16,62	22,74
	1-B	95,30	139,94	16,68	24,49	16,16	22,53
	1-C	101,10	126,38	17,69	22,12	16,15	22,38

50%	2-A	95,45	128,83	16,70	22,55	16,56	22,92
	2-B	89,33	133,14	15,63	23,30	16,10	22,59
	2-C	96,77	138,04	16,93	24,16	16,70	22,79
100%	3-A	102,66	157,69	17,97	27,60	16,51	23,33
	3-B	97,60	147,54	17,08	25,82	16,98	23,62
	3-C	99,45	155,19	17,40	27,16	15,80	22,44

Dari hasil uji kuat lentur beton bertulang seperti dalam Tabel 4.4 didapatkan bahwa beban yang bekerja pada saat mulai leleh relatif sama diantara 88,79 – 102,66 kN. Momen lentur adalah diantara 15,53 – 22,19 kNm, 15,63 – 16,93 kNm dan 17,08 – 17,97 kNm untuk masing-masing campuran dengan agregat kasar 0%, 50% dan 100% , juga ditunjukkan seperti Gambar 4.3.

4.6 Pola Retak Uji Balok Beton Bertulang

Pola retak yang terjadi adalah pola retak lentur, hal ini terlihat dari arah retak yang vertikal terhadap sumbu memanjang balok seperti terlihat pada Gambar 4.4, Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.

Balok beton dengan 0% RCA memiliki kesamaan pola retak dengan balok beton dengan 50% RCA dan balok beton dengan 100% RCA, yaitu diawali dengan terjadinya retak di tengah bentang dan dibawah beban, kemudian retak semakin lama bertambah di daerah sepertiga bentang pembebanan. Jumlah retak yang terjadi pada 3 balok beton dengan 0% RCA sebanyak 6 retakan, sedangkan pada balok beton dengan 50% RCA dan balok beton dengan 100% RCA sebanyak 7 retakan.



4.5 Pola Retak Akibat Uji Lentur Pada Balok Beton Bertulang 0%RCA



Gambar 4.6 Pola Retak Akibat Uji Lentur Pada Balok Beton Bertulang 50% RCA



Gambar 4.7 Pola Retak Akibat Uji Lentur Pada Balok Beton Bertulang 100%RCA

4.7 Daktilitas

Beban pada saat leleh untuk balok dengan 50% RCA dan 100% RCA terjadi pada deformasi yang lebih kecil, mengakibatkan daktilitas pada balok beton bertulang dengan RCA menjadi lebih besar. Secara umum daktilitas dengan RCA antara 3,07 – 4,26.

Tabel 4.5 Daktilitas Akibat Uji Lentur Pada Balok Beton Bertulang

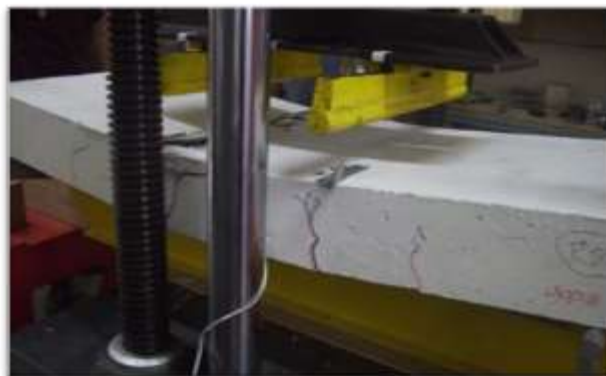
No	Py (kg)	δ_y (mm)	Pu (kg)	δ_u (mm)	Pu/Py	δ_u / δ_y
0%RCA						
1	8879,26	6,99	12313,00	17,48	1,39	2,50
2	9530,78	6,24	13993,50	18,20	1,47	2,92
3	10110,80	6,72	12638,00	17,32	1,25	2,58
50%RCA						
1	9545,48	5,85	12883,00	18,91	1,35	3,23
2	8933,74	6,21	13313,50	19,32	1,49	3,11
3	9539,76	6,28	13803,50	19,28	1,45	3,07
100%RCA						
1	10266,10	5,80	15769,00	20,36	1,54	3,51
2	9760,26	5,75	14753,50	20,14	1,51	3,50
3	9945,28	5,90	15519,00	25,15	1,56	4,26

BAB 5

Perilaku Pelat Beton Bertulang Daur Ulang

5.1 Pengujian Kuat Lentur Pelat Beton Bertulang

Pengujian kuat lentur pelat dilakukan terhadap 9 pelat beton bertulang dengan ukuran $500 \times 120 \times 1200 \text{ mm}^3$, masing-masing 3 balok untuk setiap campuran. Dimana sebelumnya beton dengan campuran yang sama telah dilakukan pengujian tekan, tarik belah, dan geser. Semua balok beton menggunakan bahan dasar semen PCC tipe I. Campuran I menggunakan agregat halus alami dan agregat kasar daur ulang 100%. Campuran II menggunakan agregat halus daur ulang 20% dan agregat kasar daur ulang 80%. Campuran III menggunakan agregat halus daur ulang 40% dan agregat kasar daur ulang 60%. Dimana semua campuran direncanakan dengan $f_c' = 20 \text{ Mpa}$. Pengujian kuat lentur balok menggunakan alat *UTM* pada umur beton 28 hari dengan pembebanan *third point loading* dan jarak antar perletakan sebesar 1050 mm.



Gambar 5.1 Pengujian Kuat Lentur

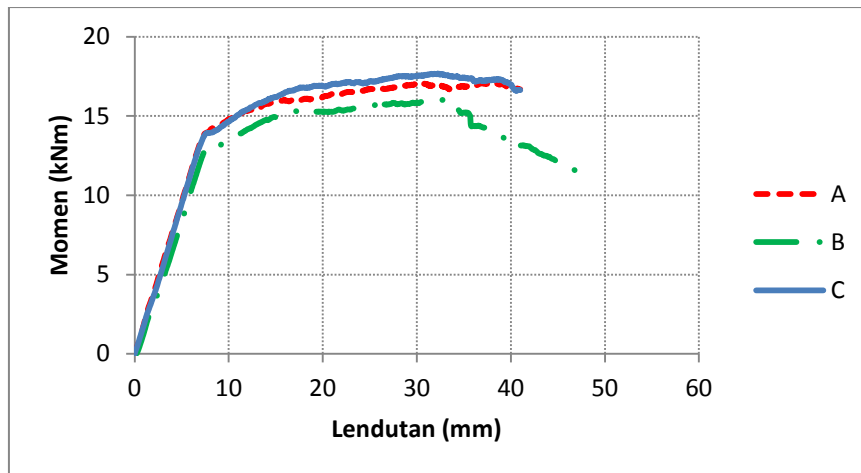
Tabel 5.1 Hasil Uji Lentur Pelat Beton Bertulang Daur Ulang

Benda Uji	Beban Ultimate	Momen Ultimate	Beban Leleh	Momen Leleh	Momen
-----------	----------------	----------------	-------------	-------------	-------

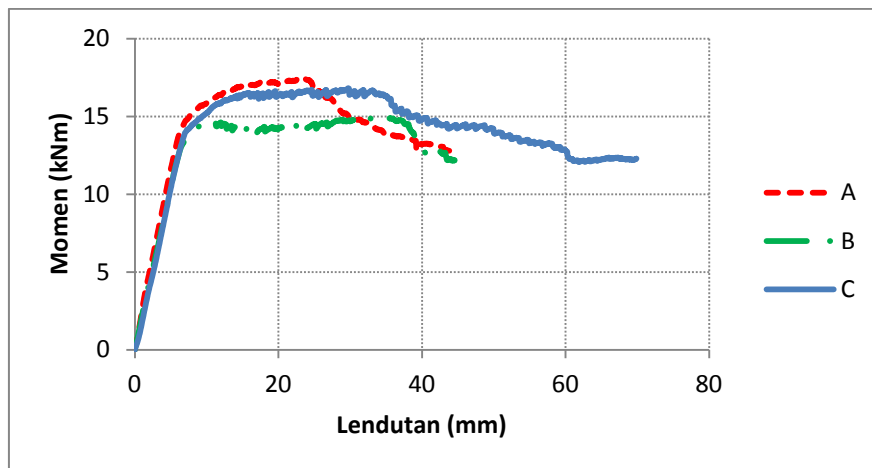
	Pu(kN)	Mu(kNm)	Py(kNm)	My(kNm)		Teoritis (kNm)
				Eksperimen	Rata-rata	
1A	97,487	17,060	76,3218	13,356	12,977	11,922
1B	91,768	16,059	70,9557	12,417		
1C	100,999	17,675	75,1789	13,156		
2A	99,738	17,454	76,518	13,391	12,942	
2B	85,239	14,917	70,5633	12,349		
2C	96,010	16,802	74,7816	13,087		
3A	86,819	15,193	64,9814	11,372	11,933	
3B	95,221	16,664	71,8632	12,576		
3C	82,301	14,403	67,7233	11,852		

Tabel 5.1 menunjukkan beban ultimate dari tiap benda uji dan perhitungan nilai momen lentur yang terjadi. Nilai momen lentur yang didapat dari eksperimen merupakan momen leleh dan nilai ini lebih besar dari momen teoritis karena, nilai f_c' dari pelat beton bertulang dengan agregat daur ulang nilainya tidak sama dengan 20 MPa. Maka dari itu, nilai momen teoritis nilainya lebih kecil daripada nilai momen pada eksperimen.

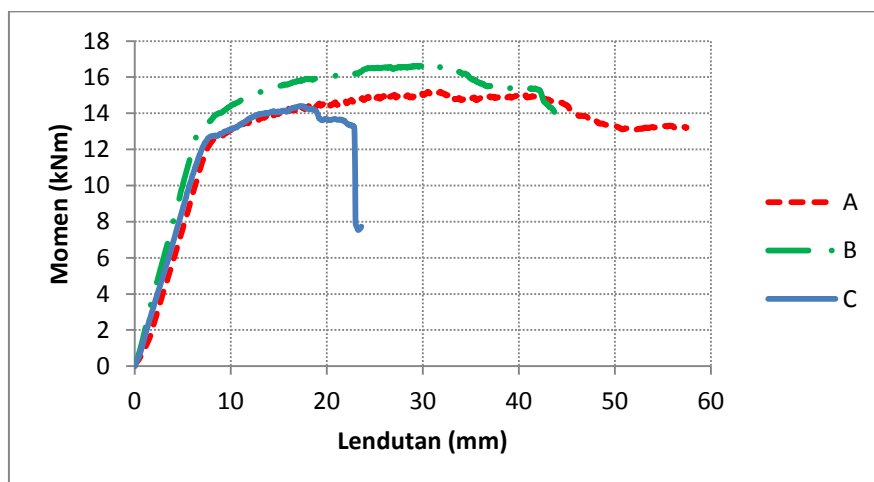
Gambar 5.2, Gambar 5.3, dan Gambar 5.4 menunjukkan hubungan momen dengan lendutan yang terjadi pada pelat beton bertulang dengan agregat daur ulang. Pada pelat beton bertulang campuran I, nilai lendutan maksimum rata-rata yang terjadi sebesar 34 mm. Pada pelat beton bertulang campuran II, nilai lendutan maksimum rata-rata yang terjadi sebesar 28 mm. Dan pada pelat beton bertulang campuran III lendutan maksimum rata-rata yang terjadi sebesar 26 mm. Pada pelat beton campuran III benda uji C, nilai lendutan yang terjadi jauh lebih kecil dari benda uji lainnya meskipun nilai beban maksimum yang dapat diterimanya tidak jauh berbeda dengan benda uji lainnya. Kemungkinan ikatan antara tulangan dan beton tidak terlalu kuat dan atau pada bagian tersebut nilai kuat tekan relatif lebih kecil dari bagian lainnya.



Gambar 5.2 Hubungan Lendutan-Momen pada Uji Pelat Beton Bertulang Campuran I



Gambar 5.3 Hubungan Lendutan-Momen pada Uji Pelat Beton Bertulang Campuran II



Gambar 5.4 Hubungan Lendutan-Momen pada Uji Pelat Beton Bertulang Campuran III

5.2 Pola Retak Pelat Beton Bertulang

Pola retak yang terjadi pada pelat beton bertulang dengan agregat daur ulang kurang lebih sama pada seluruh benda uji (Gambar 5.4). Retak terjadi di tengah bentang diikuti retak-retak yang terjadi di dekat titik beban. Namun pada benda uji 2A dan 3C terjadi lepasnya bongkahan beton yang memperlihatkan slip nya tulangan baja dengan beton seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 5.5 Pelat Bertulang Pola Retak Beton



Gambar 5.6 Pola Retak dan Lepasnya Bongkahan Beton pada Benda Uji

5.3 Daktilitas Pelat Beton Bertulang

Daktilitas dari pelat bertulang beton dengan agregat daur ulang ditunjukkan dalam Tabel 5.2. Daktilitas dari pelat bertulang ini kurang lebih sama dengan nilai daktilitas dari elemen struktur bertulang lainnya yang terbuat dari beton dengan agregat alami. Nilai daktilitas dari benda uji 3C lebih kecil dari lainnya, dapat disebabkan karena pelat telah runtuh sebelum pelat mengalami lendutan maksimumnya. Terlihat dari bongkahan beton yang lepas sehingga tulangan dari pelat terlihat.

Tabel 5.2 Daktilitas Pelat Bertulang Beton dengan Agregat Daur Ulang

Benda Uji	Lendutan (mm)		Rasio δ_u/δ_y
	δ_y	δ_u	
1A	6,96	36,88	5,30
1B	7,12	33,44	4,70
1C	6,92	32,24	4,66
2A	5,84	22,76	3,90
2B	5,96	32,40	5,44
2C	6,36	29,64	4,66
3A	7,04	30,52	4,34
3B	6,28	31,08	4,95
3C	6,84	17,40	2,54

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan untuk beton dengan kuat tekan karakteristik 25 MPa

1. Kuat tekan karakteristik beton dengan agregat kasar daur ulang menunjukkan hasil yang relatif sama dengan bertambahnya persentase agregat kasar daur ulang. Campuran 50% RCA memberikan nilai kuat tekan karakteristik aktual 28,7 MPa sedangkan campuran 100% RCA sebesar 28,3 MPa.
2. Kuat tarik belah beton dengan agregat kasar daur ulang menunjukkan hasil yang relatif sama dengan bertambahnya persentase agregat kasar daur ulang. Campuran 50% RCA sebesar 2,56 MPa sedangkan 100% RCA sebesar 2,81 MPa.
3. Semakin besar persentase agregat kasar daur ulang yang digunakan, semakin turun nilai kuat lentur pada pelat beton bertulang.
4. Semakin besar persentase agregat kasar daur ulang yang digunakan semakin turun nilai kuat gesernya.
5. Semakin besar persentase agregat kasar daur ulang yang digunakan semakin besar nilai daktilitasnya.

6.2 Kesimpulan untuk beton dengan kuat tekan karakteristik 20 MPa

1. Semakin besar persentase agregat halus daur ulang yang digunakan, semakin turun nilai kuat tekan karakteristiknya. Untuk proporsi 40% agregat halus daur ulang mempunyai nilai kuat tekan karakteristik tidak mencapai 20 MPa.
2. Semakin besar persentase agregat halus daur ulang yang digunakan, semakin turun nilai kuat tarik belah dan kuat tarik lenturnya. Nilai kuat tarik yang didapatkan tidak melebihi nilai kuat tarik ijin sehingga dinilai tidak aman.
3. Semakin besar persentase agregat halus daur ulang yang digunakan, semakin turun nilai kuat gesernya. Nilai kuat geser yang didapatkan masih jauh melebihi nilai kuat geser ijin sehingga dianggap aman menggunakan nilai $f_v < \frac{1}{6} \sqrt{f_c'}$.
4. Daktilitas ketiga campuran menunjukkan nilai yang hampir sama besar.
5. Semakin besar persentase agregat halus daur ulang yang digunakan, semakin turun nilai kuat lentur pada pelat beton bertulang, namun nilainya tidak terlalu signifikan.

6.3 Saran

1. *Trial mixed* perlu dilakukan beberapa kali sehingga proporsi campuran lebih sempurna dan memperoleh sifat-sifat beton yang diinginkan.
2. Peralatan laboratorium yang lama perlu diperbaharui sehingga menunjang hasil penelitian yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318 (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary*. Farmington Hills, USA.
- ASTM C 78. *Standard Test Method for Flexural Strenght of Concrete Using Simple Beam with Thrid-Point Loading*. Farmington Hills, USA.
- Departemen Pekerjaan Umum : SNI 03-2847-2002. (2002). *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, Indonesia.
- El-Reedy, M. A. (2009). *Advanced Materials and Techniques for Reinforced Concrete Stuctures*. CRC Press.
- Lauw, C. (2009). *Teknologi Bahan Konstruksi*. Diktat kuliah Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, Indonesia.
- Nawy, Edward G. (2005). *Reinforced Concrete*. 5th ed.
- Neville, A.M. 1981. *Properties of Concrete*. Pittman Publication, 3rd ed.
- Nugraha, P., Antoni (2007). *Teknologi Beton: Dari Material, Pembuatan, ke Beton Kinerja Tinggi*, Penerbit Andi, Yokyakarta, Indonesia.
- Pani, L., Francesconi, L. and Concu, G. (2011). *Influence of Replacement Percentage of Recycle Aggregates on Recycled Aggregate Concrete Properties, Symposium PRAGUE*, Fib.
- Yong, P.C., Teo, D.C.L. (2009). *Utilisation of Recycled Agregate as Coarse Aggregate in Concrete*, UNIMAS E-Journal of Civil Engineering.
- Hansen, T.C. (1992). *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*. 1st ed. Taylor & Francis Group.

